

# **SIMULAÇÃO DE EMBEBIÇÃO EM ELEMENTOS MULTICAMADA**

Análise do fenómeno de interface

**SARA ISABEL LOBO DE CASTRO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Sofia Moreira dos Santos Guimarães Teixeira

JUNHO 2015

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

*Sê todo em cada coisa. Põe quanto és no mínimo que fazes.*

*Fernando Pessoa*



## **AGRADECIMENTOS**

A chegada ao final desta jornada requer agradecimentos, nomeadamente:

À Doutora Ana Sofia Guimarães, orientadora desta tese, por me ter aceitado tão tardiamente, por ter estado tão presente nas etapas mais difíceis, por toda a confiança, empenho, incentivo e dedicação que me prestou e, principalmente pela disponibilidade que mostrou durante este tempo. Não seria possível este produto sem tão oportuna orientação.

Ao Doutor João Delgado pelo auxílio prestado e pela simpatia com que me recebeu.

Aos meus pais que me sempre me apoiaram, principalmente nesta última etapa tão importante.

Agradecer por todos os valores que me inculcaram, pela força e paciência com que me têm educado e guiado em todas as fases da minha vida.

À Catarina, por ter sido o meu alento, o meu braço direito, por me ter dado a confiança e vontade para lutar até ao fim não só nesta etapa, mas durante o curso. Sem ti, nada.

Ao meu irmão Pedro, por ter acompanhado este processo e por me incentivar durante este percurso.

Aos meus avós que desde pequena me inculcaram a vontade de crescer, de aprender e a lutar pelo que quero.

Aos meus amigos, os mais especiais, por me ajudarem, fazerem-me rir e por me fazerem encarar esta etapa e a vida com mais alegria e felicidade.



## **RESUMO**

A interface refere-se à heterogeneidade dos sistemas construtivos que é necessária para suprir as várias exigências inerentes à construção. O reconhecimento das zonas de interface como as zonas mais críticas em termos de patologias no processo de construção, tem gerado um interesse nesta área e na sua gestão de forma a otimizar o processo construtivo e a diminuir o risco de aparecimento de patologias.

A utilização crescente de programas de cálculo automático tem dado origem a vários estudos que pretendem aferir a fiabilidade dos resultados obtidos por simulação em comparação com os ensaios laboratoriais e os resultados teóricos expectáveis. O WUFI, enquanto modelo de simulação numérico na área da higrotérmica, tem sido amplamente utilizado para o estudo do transporte de humidade nas suas várias vertentes e por isso foi o modelo escolhido para simular várias amostras de elementos multicamadas.

O objetivo das simulações numéricas era recriarem, o mais aproximadamente possível, os ensaios laboratoriais efetuados anteriormente. Foram estudadas quatro amostras: um provete monolítico de referência e três provetes com interfaces contacto perfeito, espaço de ar e contacto hidráulico. A partir dos perfis hídricos obtidos do WUFI foram tirados os pontos que permitiram gerar as curvas de absorção em função do tempo e em função da raiz do tempo que permitiram calcular o FLUMAX e o coeficiente de capilaridade, respetivamente. No final foram comparadas as várias curvas obtidas por simulações com as resultantes dos ensaios e comentadas a partir dos resultados teóricos esperados.

Conclui-se que o WUFI não tem em conta as resistências hídricas nas interfaces contacto perfeito e contacto hidráulico e não considera o corte hídrico no caso do espaço de ar. No entanto, uma análise local ao interior das interfaces mostrou que o transporte de humidade, nessa zona, se processa de acordo com o esperado. O transporte de humidade global não é influenciado por esse transporte local, nos resultados que o WUFI apresenta em cada simulação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Humidade, WUFI 2D, Interface, Absorção.





## **ABSTRACT**

The interface refers to the heterogeneity of the constructive systems necessary to meet the various requirements inherent in construction. Recognition of interface zones as the most critical areas in terms of pathologies in the construction process, has generated an interest in this area and in its management in order to optimize constructive process and decrease the risk of pathologies.

The increasing use of automatic calculation programs has given rise to several studies that aim to assess the reliability of the results obtained by simulation in comparison with laboratory testing and theoretical results expected. The WUFI, while numerical simulation model in hygrothermics area, has been widely used for the study of moisture transport in its various strands and so was the model chosen to simulate several samples of multilayer elements.

The goal of the numerical simulations was recreate, as nearly as possible, the laboratory tests carried out previously. Four samples were studied: a monolithic piece of reference and three test-pieces with interfaces as perfect contact, air space and hydraulic contact. From the hydric profiles obtained from WUFI were taken the points that made it possible to generate the absorption curves as a function of time and depending on the root of the time allowed to calculate the FLUMAX and the coefficient of capillarity, respectively. At the end were compared the various curves obtained by simulation with the result of the tests and commented from the expected theoretical results.

It is concluded that the WUFI does not take into account the water resistance in the perfect and hydraulic contact interfaces and does not consider the hydric cut in the case of air space. However, a local analysis into the interfaces showed that the moisture transport in the area, takes place according to the expected. The global moisture transport is not influenced by this local transport, in the results that the WUFI presents in each simulation.

**KEYWORDS:** Moisture, WUFI 2D, Interface, absorption



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 ÂMBITO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 ESTRUTURA DO TEXTO.....	2
<b>2. INTERFACE EM ELEMENTOS MULTICAMADA</b> .....	3
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. TIPOS DE INTERFACE .....	4
2.2.1. CONTACTO PERFEITO.....	4
2.2.2. CONTACTO HIDRÁULICO .....	6
2.2.3. ESPAÇO DE AR.....	8
2.3. ESTUDOS REALIZADOS.....	9
2.3.1. VASCO FREITAS – 1992.....	9
2.3.1.1. Modelo adotado.....	9
2.3.1.2. O ensaio .....	10
2.3.1.3. Resultados .....	11
2.3.2. ALISTAIR GIBB – 1993 A 1995.....	13
2.3.2.1. O método.....	13
2.3.2.2. Modelo adotado.....	13
2.3.2.3. Resultados .....	14
2.3.4. H.J.P. BROCKEN – 1998.....	14
2.3.4.1. Modelo adotado.....	14
2.3.4.2. O ensaio .....	15
2.3.4.3. Resultados .....	16
2.3.5. XIAOCHUAN QIU – 2003.....	17
2.3.5.1. Modelo adotado.....	17
2.3.5.2. O ensaio .....	19

2.3.5.3. Resultados .....	20
2.3.6. H. DERLUYN & H. JANSSEN & J. CARMELIET (2011).....	22
2.3.6.1. Modelo adotado.....	22
2.3.6.2. O ensaio .....	23
2.3.6.3. Resultados .....	23
2.3.7. H. DERLUYN & H. JANSSEN & J. CARMELIET (2012).....	24
2.3.7.1. Modelo adotado.....	24
2.3.7.2. O ensaio .....	25
2.3.7.3. Resultados .....	25
<b>2.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>25</b>

### **3. O MODELO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA: WUFI 2D ... 27**

<b>3.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2. APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3. FICHEIRO .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4. INPUT .....</b>	<b>29</b>
3.4.1. INFO.....	30
3.4.2. CONSTRUCTION .....	30
3.4.2.1. Select Material.....	30
3.4.2.2. Definition of the construction .....	31
3.4.3. BOUNDARY CONDITIONS .....	32
3.4.3.1. Surface Transfer.....	32
3.4.3.2. Climate .....	33
3.4.4. PARAMETERS .....	34
3.4.4.1. Initial conditions.....	34
3.4.4.2. Calculation Parameters .....	35
3.4.5. NUMERIC.....	35
<b>3.5. CALCULATION .....</b>	<b>36</b>
<b>3.6. OUTPUT .....</b>	<b>36</b>
<b>3.7. PERFIS HÍDRICOS.....</b>	<b>37</b>
<b>3.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>39</b>

<b>4. SIMULAÇÃO DINÂMICA DO FENÓMENO DA CAPILARIDADE. ANÁLISE DA INTERFACE.....</b>	<b>41</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	41
4.2. ENSAIOS LABORATORIAIS .....	41
4.2.1. ENSAIOS .....	41
4.2.2. RESULTADOS.....	42
4.3. SIMULAÇÕES EFETUADAS .....	45
4.3.1. OS PROJETOS DEFINIDOS .....	45
4.3.2. CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS .....	47
4.3.3. RESULTADOS.....	49
4.4. ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS.....	54
4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	60
 <b>5. CONCLUSÃO .....</b>	 <b>64</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	64
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	65
 BIBLIOGRAFIA .....	 66



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Configurações de Contacto: A – Contacto hidráulico; B – Contacto perfeito; C – Espaço de ar [2].	4
Figura 2.2. – Influência da interface no processo de embebição [5].	5
Figura 2.3. – Bloco em contacto perfeito [2].	5
Figura 2.4. – Princípio de cálculo da relação R (pc) [5].	6
Figura 2.5. – Contacto hidráulico perfeito [6].	6
Figura 2.6. – Contacto hidráulico imperfeito. Esquerda: material 1 – material 2; direita: material 2 – material 1	7
Figura 2.7. – Curvas de absorção na interface de contacto hidráulico real e contacto hidráulico perfeito [7].	7
Figura 2.8. – Princípio de cálculo da função $S(\phi)$ [2].	8
Figura 2.9. – Exemplo provetes [5].	9
Figura 2.10. – Modelo de ensaio [5].	10
Figura 2.11. – Variação da absorção de água em provetes de barro vermelho (esquerda) e betão celular) [5].	11
Figura 2.12. – Atraso na embebição com interfaces a diferentes alturas [5].	11
Figura 2.13. – Inexistência de atraso na embebição [5].	12
Figura 2.14. – Atraso na embebição de provetes com espaço de ar [5].	12
Figura 2.15. – Interfaces chave estudadas [3].	13
Figura 2.16. – Modelo físico do contacto perfeito.	14
Figura 2.17. – Modelo físico de contacto hidráulico [9].	14
Figura 2.18. – Material necessário à realização do NMR [9].	15
Figura 2.19. – Esquema do ensaio NMR.	15
Figura 2.20. – Transformação de Boltzmann dos perfis hídricos da amostra monolítica [9].	16
Figura 2.21. – (a) perfis hídricos de teor de humidade; (b) utilização da curva de Boltzmann nos perfis hídricos [9]	16
Figura 2.22. – Perfis hídricos de contacto hidráulico [9].	17
Figura 2.23. – Modelo físico monolítico [6].	17
Figura 2.24. – Modelo físico com contacto perfeito [6].	18
Figura 2.25. – Dois modelos físicos de contacto hidráulico [6].	18
Figura 2.26. – Esquema do ensaio [6].	19
Figura 2.27. – Perfil Hídrico do provete monolítico (A) [6].	20

Figura 2.28. – Perfil hídrico do provete de contacto perfeito (B) [6].	21
Figura 2.29. – Perfis hídricos de provetes em contacto hidráulico: betão em contacto com a água à esquerda; argamassa em contacto com a água à direita [6].	21
Figura 2.30. – Perfis hídricos de provetes em contacto perfeito: betão em contacto com a água à esquerda; argamassa em contacto com a água à direita [6].	22
Figura 2.31. – Modelo físico adotado [4].	22
Figura 2.32. – Perfis hídricos no interior da argamassa: (a) argamassa curada em molde; (b) tijolos saturados; (c) tijolos secos [4].	23
Figura 2.33. – Curvas do fluxo da humidade pela raiz quadrado do tempo [4].	24
Figura 2.34. – Modelo físico das amostras.	24
Figura 3.1. – Ecrã Principal.	29
Figura 3.2. – Menus.	29
Figura 3.3. – Menu Info.	30
Figura 3.4. – Construção.	30
Figura 3.5. – Selecionar material.	31
Figura 3.6. – Definição da construção.	32
Figura 3.7. – Definição da superfície.	33
Figura 3.8. – Clima.	33
Figura 3.9. – Clima da base.	34
Figura 3.10. – Condições iniciais de temperatura.	34
Figura 3.11. – Condições iniciais de humidade relativa.	35
Figura 3.12. – Parâmetros de cálculo	35
Figura 3.13. – Parâmetros numéricos	36
Figura 3.14. – Gráficos de resultados.	36
Figura 3.15. – Perfil hídrico longitudinal (1h).	37
Figura 3.16. – Perfil hídrico longitudinal (1dia).	38
Figura 3.17. – Perfil hídrico transversal (1h).	38
Figura 3.18. – Perfil hídrico transversal (1dia).	39
Figura 4.1. – Esquema dos provetes ensaiados [2].	42
Figura 4.2. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos.	42
Figura 4.3. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes em contacto perfeito.	43
Figura 4.4. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes com espaço de ar.	43



Figura 4.5. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes em contacto hidráulico.....	43
Figura 4.6. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, dos provetes em contacto perfeito.....	44
Figura 4.7. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar.....	44
Figura 4.8. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, dos provetes em contacto hidráulico. ....	45
Figura 4.9. – Esquema do provete monolítico à esquerda; provete em contacto perfeito à direita .....	45
Figura 4.10. – Esquema dos provetes: à esquerda espaço de ar, à direita em contacto hidráulico. ...	46
Figura 4.11. – Climas das faces laterais e superior à esquerda; clima da base à direita.....	46
Figura 4.12. – Esquema do método das fatias no provete. ....	48
Figura 4.13. – Esquema do método das fatias no perfil hídrico.....	49
Figura 4.14. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete monolítico. ....	50
Figura 4.15. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete em contacto perfeito.....	50
Figura 4.16. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete com espaço de ar.....	50
Figura 4.17. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete em contacto hidráulico. ....	51
Figura 4.18. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, do provete em contacto perfeito.....	51
Figura 4.19. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, do provete com espaço de ar.....	52
Figura 4.20. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, do provete em contacto hidráulico. ....	52
Figura 4.21. – Curvas de absorção de água por capilaridade do interior das interfaces. ....	53
Figura 4.22. – Curvas de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete monolítico. ....	54
Figura 4.23. – Curvas de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes em contacto perfeito.....	55
Figura 4.24. – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes com espaço de ar.....	55
Figura 4.25. – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes em contacto hidráulico. ....	56
Figura 4.26. – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes em contacto perfeito.....	58

Figura 4.27. – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar. ....	58
Figura 4.28. – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes em contacto hidráulico. ....	59

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. – Configuração dos vários provetes ensaiados [5].	10
Tabela 2.2. – Resumo dos modelos ensaiados por Qiu.	19
Tabela 2.3. – Totalidade de ensaios efetuados.	20
Tabela 2.4. – Condições de continuidade na interface [5].	26
Tabela 4.1. – Coeficientes de capilaridade dos ensaios.	44
Tabela 4.2. – Valores de FLUMAX dos ensaios laboratoriais.	45
Tabela 4.3. – Condições ambientais do laboratório [2].	46
Tabela 4.4. – Uniformização dos resultados dos ensaios laboratoriais no provete monolítico.	48
Tabela 4.6. – Coeficientes de capilaridade das simulações.	51
Tabela 4.7. – Valores de FLUMAX das simulações numéricas.	52
Tabela 4.8. – Comparação dos valores dos coeficientes de capilaridade.	57
Tabela 4.9. – Comparação dos valores do FLUMAX.	59
Tabela 4.10. Resumo dos resultados dos ensaios vs simulações para o coeficiente de capilaridade dos elementos monolítico e em contacto perfeito.	61
Tabela 4.11. Resumo dos resultados dos ensaios vs simulações para o coeficiente de capilaridade dos elementos com espaço de ar e em contacto hidráulico.	62
Tabela 4.12. – Resumo dos resultados dos ensaios vs simulações para o FLUMAX.	63



## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

$dH/dT$  – Capacidade de armazenamento de calor, material húmido [ $J/m^3$ ]

$d_w/d_\phi$  – Capacidade de armazenamento de humidade, material húmido [ $kg/m^3$ ]

$\lambda_w$  – Condutibilidade térmica do material húmido [ $W/(m.K)$ ]

$D_\phi$  – Coeficiente de condução líquida [ $kg/(m.s)$ ]

$\delta_p$  – Permeabilidade ao vapor de água do material [ $kg/(m.s.Pa)$ ]

$h_v$  – Calor latente de evaporação da água [ $J/kg$ ]

$p_{sat}$  – Pressão de saturação do vapor de água [ $Pa$ ]

$T$  – Temperatura do ar [ $^{\circ}C$ ]

$\phi$  – Humidade relativa [-]

$A$  – Coeficiente de absorção de água por capilaridade [ $kg/(m^2.s^{1/2})$ ]

$p_c$  – Pressão capilar [ $Pa$ ]

$R$  – Constante dos gases ideais [ $MPa.cm^3/(mol.K)$ ]

$W_1$  – Teor de humidade da camada 1 [ $kg/m^3$ ]

$W_2$  – Teor de humidade da camada 2 [ $kg/m^3$ ]

FLUMAX – Fluxo máximo Transmitido [ $kg/(m^2.s)$ ]

HR – Humidade relativa [%]

LFC – Laboratório de Física das Construções

AAC – Betão areado autoclavado



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 ÂMBITO

Os modelos de simulação numérica e a sua crescente importância têm dado origem a estudos mais detalhados deste tipo de ferramentas com o intuito de aferir a sua utilidade e eficiência. O uso de programas de cálculo automático é uma mais-valia uma vez que conduz a soluções mais eficientes tanto a nível económico como ambiental.

A presença de materiais heterogéneos na construção origina o contacto entre elementos com porosidades diferentes. Esta diferença de porosidades afeta o transporte da humidade ao longo desses elementos e pode gerar patologias que afetam não só o funcionamento do edifício como a sua vida útil. O conhecimento mais profundo do fenómeno de interface pode contribuir para a diminuição do aparecimento de patologias.

Embora haja uma maior utilização dos programas de cálculo automático e um maior interesse pelo fenómeno da interface, não há muitos estudos que combinem os dois e, por isso, este trabalho tem como objetivo contribuir para o aumento do conhecimento nesta área.

O WUFI 2D é um programa utilizado para o estudo higrotérmico dos edifícios e dada a crescente importância do fenómeno da interface é interessante perceber como é que esta é retratada nas simulações. Assim, este trabalho foca-se na utilização do WUFI 2D para a definição de simulações numéricas que recriem os ensaios laboratoriais efetuados anteriormente.

Partindo do levantamento de informação teórica sobre o fenómeno e o programa, foram criadas simulações com o objetivo de avaliar a influência da interface no transporte de humidade simulado comparando resultados com os ensaios de absorção capilar efetuados em laboratório e com outros ensaios presentes em vários estudos sobre esta temática.

## 1.2 OBJETIVOS

Em termos teóricos este trabalho visa analisar o fenómeno da interface, as suas condições de continuidade e os valores dos coeficientes de capilaridade e FLUMAX, associados às curvas de absorção por capilaridade dos provetes, com o objetivo de caracterizar o transporte de humidade ao longo de elementos multicamada e, especialmente, nas zonas de interface.

Em termos práticos o grande objetivo é recriar no WUFI 2D as condições dos ensaios laboratoriais e estudar o transporte de humidade simulado em elementos multicamadas, fazendo a análise comparativa com os valores obtidos nos ensaios e nos vários estudos dedicados ao fenómeno da interface.

Pretende-se, também, perceber como o WUFI 2D analisa a interface e a sua influência no transporte de humidade e avaliar quantitativamente a resistência hídrica que o programa considera comparando-a com valores resultantes dos ensaios.

### **1.3 ESTRUTURA DO TEXTO**

Este trabalho divide-se em cinco capítulos abaixo listados:

- O capítulo 1, atual capítulo, que corresponde à introdução. Enquadra-se o contexto do estudo, a sua relevância e especifica-se a estrutura do trabalho;
- O capítulo 2 é relativo ao fenómeno da interface. São caracterizadas as várias interfaces, as suas condições de continuidade e a sua influência no transporte de humidade. É apresentado o conceito de FLUMAX e são analisados estudos sobre o fenómeno da interface;
- O capítulo 3 é uma abordagem teórica ao programa de simulação numérica WUFI 2D. São apresentados os vários menus e as suas funcionalidades. Apresentam-se os resultados e as suas formas de apresentação;
- O capítulo 4 é dedicado às simulações. São apresentados os resultados do ensaio, calculados os coeficientes de capilaridade e os FLUMAX para cada amostra simulada e posteriormente é feita uma análise comparativa dos resultados das simulações numéricas e dos ensaios laboratoriais;
- O capítulo 5 descreve as principais conclusões do trabalho e refere algumas considerações finais da tese.



## **2.**

### **INTERFACE EM ELEMENTOS MULTICAMADAS**

#### **2.1. INTRODUÇÃO**

A heterogeneidade dos sistemas construtivos é algo corrente e, de certa forma, necessário. Surge pela necessidade de suprir as várias exigências inerentes à construção sejam elas estruturais, de conforto entre outras e está presente na construção em geral. Esta já referida heterogeneidade é bastante interessante do ponto de vista do estudo do comportamento da humidade, na medida em que este é sobretudo afetado pela diferente porosidade dos materiais constituintes de um sistema construtivo e pelo tipo de ligações de interface.

As alvenarias caracterizam-se pelo tipo de construção com materiais naturais (pedras) ligadas por argamassa e tem o início da sua história na Antiguidade. Mantiveram-se no topo das soluções construtivas mais utilizadas até à Revolução Industrial que trouxe consigo novos materiais, como por exemplo o cimento Portland, que tornaram a construção em betão armada a mais procurada na atualidade. A sua utilização tem vindo a ser retomada devido a fatores económicos [1].

Esta pequena referência histórica afigura-se relevante se se tiver em conta que grande parte dos edifícios portugueses são construções em alvenaria e que, portanto, estudar e perceber o funcionamento de interfaces neste tipo de construção é fundamental para caracterização de fenómenos, definição de soluções e aplicação de medidas preventivas para proteção do património edificado.

A interface, enquanto parte de um sistema construtivo, tem uma grande influência na forma como a humidade se transporta nesse mesmo sistema.

Apesar de existirem diferentes estudos sobre o transporte de água em sistemas compostos, estes debruçam-se sobre elementos em contacto com o solo e não sobre o transporte de água entre materiais de construção. Entre estes verifica-se uma grande diferença no tipo de transporte e, sobretudo, da porosidade do meio. Enquanto no solo a gravidade exerce uma grande influência no transporte da água, no caso dos materiais de construção são as forças capilares que intervêm no transporte da humidade. Em termos de dimensão dos poros é de fácil aceitação que o solo dispõe de uma dimensão porosa bastante superior à dos materiais de construção pelo que devem ser acauteladas estas diferenças [2].

O transporte de humidade na interface tem assumido crescente importância nas últimas décadas, uma vez que esta condiciona o transporte de água e muito contribui para o aparecimento de patologias.

Já em 1996, numa conferência internacional, Alistair G.F. Gibb [3] constata que as zonas fronteiriças das interfaces são o local de concentração dos problemas mais complexos em edifícios de construção, assim como referiu que estes mesmos problemas afetam não só o design como a resposta do edifício ao longo do tempo.

Citando o autor: “A chave para melhorar a eficiência do design e da construção do edifício reside na área de gestão das interfaces” [3].

Neste trabalho dá-se prioridade ao estudo do transporte da humidade em vários sistemas construtivos com diferentes interfaces recorrendo ao software WUFI 2D com o objetivo de avaliar a eficiência dos programas de cálculo na definição da interface, por comparação com resultados de ensaios laboratoriais.

## 2.2. TIPOS DE INTERFACE

O estudo da influência da interface em elementos multicamada no transporte de humidade pressupõe o prévio conhecimento das várias configurações de contacto existentes.

Em termos construtivos refiram-se as configurações importantes:

- 1) Contacto perfeito: ocorre quando há contacto entre as camadas mas as suas estruturas porosas não se interpenetram;
- 2) Contacto hidráulico: as estruturas porosas das camadas interpenetram-se;
- 3) Espaço de ar: as camadas são separadas por uma camada de ar de espessura milimétrica variável.

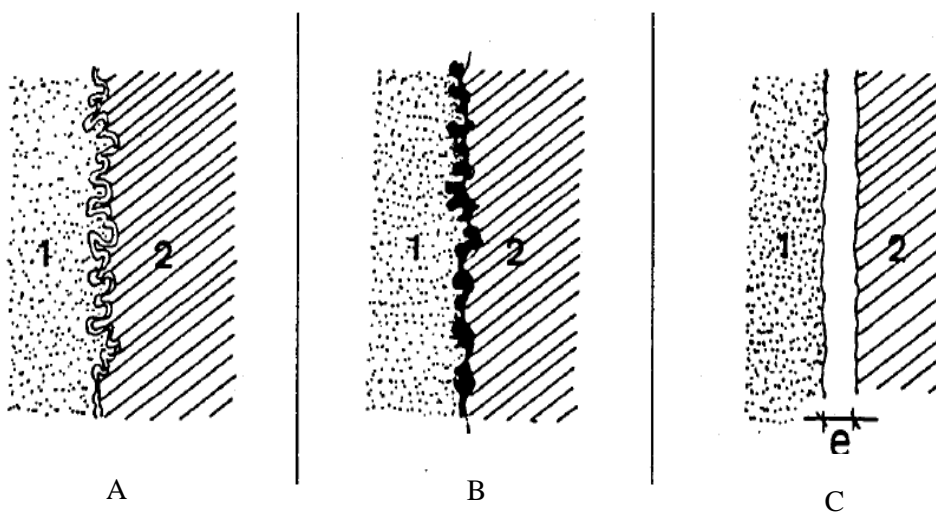


Figura 2.1 – Configurações de Contacto: A – Contacto hidráulico; B – Contacto perfeito; C – Espaço de ar [2].

### 2.2.1. CONTACTO PERFEITO

Neste caso as duas camadas são colocadas em contacto de forma justaposta, mas não há continuidade da estrutura porosa pelo que existe uma separação que resulta numa resistência hídrica.

Uma forma interessante de verificar a alteração do transporte de água é comparar um elemento cerâmico fraturado e o mesmo elemento cortado em que se sobrepõem as duas camadas de forma a torná-lo numa única peça e avaliar as diferentes respostas. Nos ensaios verifica-se que o elemento fraturado se comporta como monolítico (peça única), enquanto o elemento cortado apresentará uma resistência na zona de corte/interface. Isto resulta do facto de, embora o elemento se encontre fraturado, a sua estrutura permanecer praticamente intacta enquanto no elemento cortado não existe ligação entre a estrutura porosa das duas camadas [4].

No contacto perfeito deverá existir uma continuidade na temperatura, assim como uma igualdade na entrada e saída dos fluxos térmicos na zona da interface. No que concerne à humidade, os estudos desenvolvidos por Vasco Freitas [5] evidenciam que a descontinuidade da estrutura porosa cria um limite para o fluxo máximo transmitido – FLUMAX – na zona de resistência hídrica e mostram ainda que a pressão capilar dos dois elementos é distinta pelo que não é possível estabelecer uma ligação entre o teor de humidade das duas partes.

O fluxo máximo transferido permite inferir da maior ou menor facilidade com que a transferência de humidade é efetuada na zona de resistência hídrica na interface. A sua obtenção prende-se com a definição da pendente da curva de absorção de água por capilaridade em função do tempo na zona em que a interface é atingida.

Na figura 2.2. apresenta-se um gráfico resultante dos estudos de Vasco Freitas [5] que mostra o atraso que a interface provoca na embebição. A comparação da curva do provete monolítico com as curvas relativas a provetes com interfaces em contacto perfeito a diferentes alturas mostra o atraso na embebição que ocorre quando a água atinge a interface. O transporte passa a fazer-se de forma mais lenta. Esta alteração é traduzida pelo declive menor que as curvas dos provetes em contacto perfeito apresentam.

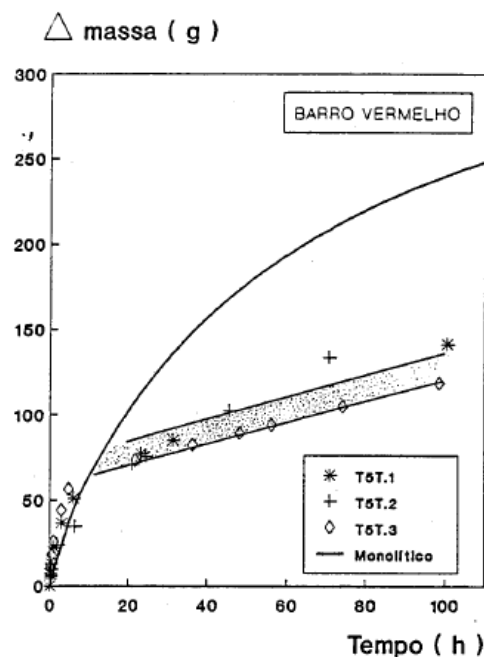


Figura 2.2. – Influência da interface no processo de embebição [5].

Na figura 2.3. esquematiza-se o processo de criação dos provetes em contacto perfeito. A divisão de um elemento monolítico em duas partes e a justaposição das mesmas origina um provete em contacto perfeito.

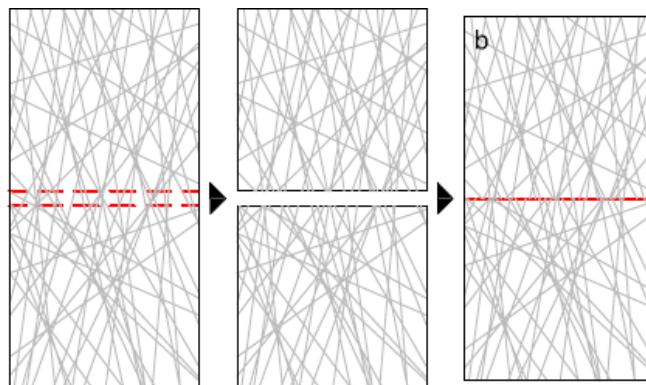


Figura 2.3. – Bloco em contacto perfeito [2].

## 2.2.2. CONTACTO HIDRÁULICO

Ocorre geralmente em camadas efetuadas 'in situ' em que as estruturas porosas se ligam.

Define-se contacto hidráulico perfeito como estruturas porosas dos materiais que se ligam de tal forma que, em caso de materiais iguais, o elemento se comporta como um monolítico, ou seja, a zona da interface não tem qualquer influência no transporte da humidade. Na prática esta situação perfeita não ocorre e, por isso, define-se contacto hidráulico imperfeito [6].

Em termos teóricos, o contacto hidráulico caracteriza-se pela continuidade da temperatura e pela igualdade entre o fluxo térmico e o de humidade que sai da camada 1 (camada inferior) e entra na camada 2 (camada superior) do provete. Contrariamente ao caso do contacto perfeito, a pressão capilar é contínua, embora os teores de humidade nas duas camadas sejam diferentes [5]. A continuidade da pressão capilar a montante e a jusante da interface permite definir uma relação entre os teores de humidade de cada camada nessa zona ( $W_1 = R W_2$ ), através do princípio de cálculo apresentado na figura 2.4.

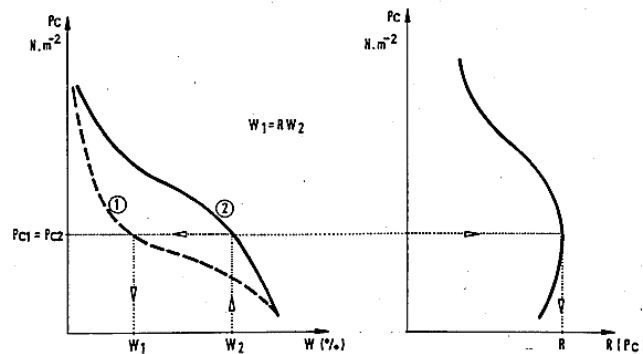


Figura 2.4. – Princípio de cálculo da relação  $R$  (pc) [5].

Relativamente ao contacto hidráulico imperfeito não há continuidade ao nível da pressão capilar. Qiu [6] refere que existe uma relação única entre o teor de humidade do material 1 e do material 2 quando em contacto hidráulico perfeito, visível na figura 2.5. que representa a curva que relaciona o teor de humidade e a pressão capilar de cada material, uma vez que o teor de humidade do primeiro material, na zona da interface, corresponde somente ao teor de humidade do material 2 nessa mesma interface.

Verifica-se na análise gráfica que, pelo facto de as propriedades dos materiais serem diferentes, o teor de humidade da camada de onde sai a água pode ser menor que o da camada onde a água entra [6].

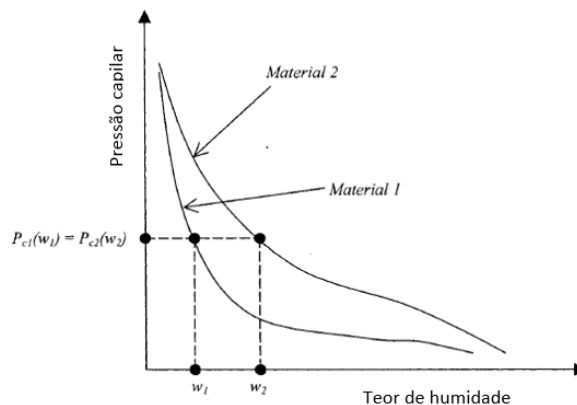


Figura 2.5. – Contacto hidráulico perfeito [6].

Seguindo essa mesma ideia o autor sugere que uma melhor avaliação é realizada quando se têm em conta apenas as forças geradoras do transporte já que, no caso de dois materiais com propriedades diferentes, o teor de humidade dos próprios materiais pode ser diferente o que se pode traduzir numa avaliação errada do comportamento na interface.

Por outro lado, não há qualquer relação entre o teor de humidade do material 1 e do material 2 no caso do contacto hidráulico imperfeito o que por si só implica diferenças significativas na avaliação do comportamento das interfaces aquando da construção de um edifício. Na figura 2.6. apresentam-se duas curvas que relacionam a pressão capilar e o teor de humidade de dois materiais em contacto hidráulico imperfeito.

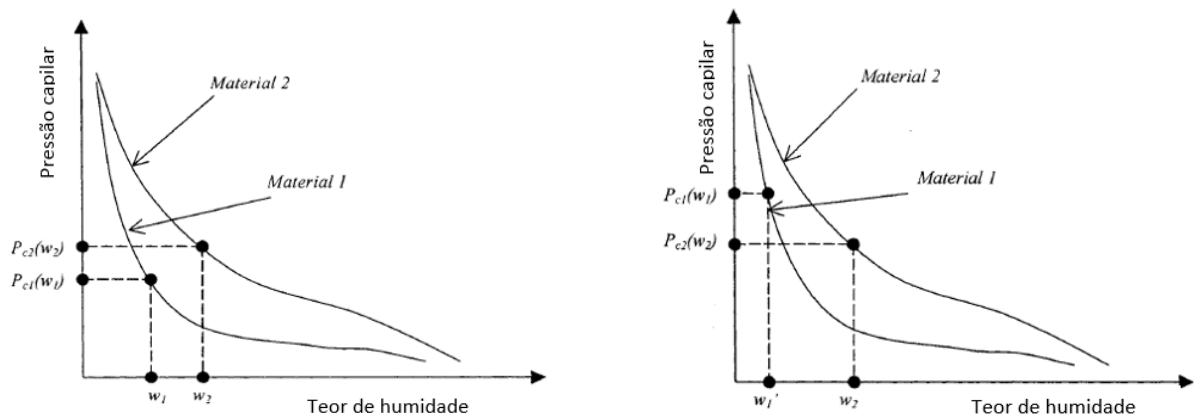


Figura 2.6. – Contacto hidráulico imperfeito. Esquerda: material 1 – material 2; direita: material 2 – material 1

Alguns estudos demonstram que uma ligação real de contacto perfeito é obtida quando se coloca argamassa fresca em contacto com o tijolo. Esta justaposição implica uma boa ligação ao nível da interface de tal forma que esta deixa de ter esse nome para ser chamada de zona ‘interfacial’. Eis a razão: a porosidade do tijolo implica a absorção da água presente na argamassa e, consequentemente, de algumas partículas da própria argamassa o que provoca uma diminuição da relação água/cimento na zona da interface durante a cura, alterando não só as características porosas como o próprio transporte de humidade da argamassa [7].

Na figura 2.7. apresentam-se as curvas de absorção por capilaridade relativas ao contacto hidráulico perfeito e ao contacto hidráulico real, onde é visível a existência da resistência hídrica traduzida no atraso da embebição no caso do contacto hidráulico real.

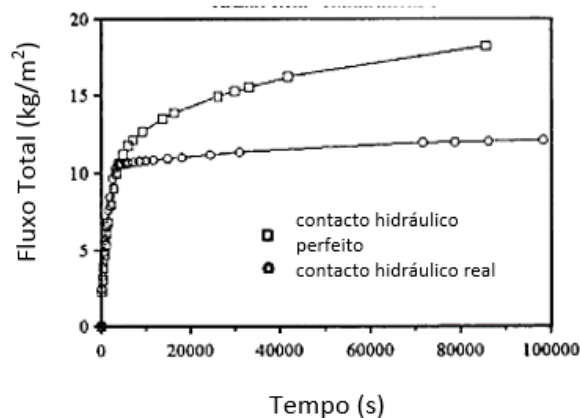


Figura 2.7. – Curvas de absorção na interface de contacto hidráulico real e contacto hidráulico perfeito [7].

### 2.2.3. ESPAÇO DE AR

É uma configuração corrente na construção de paredes, exemplo das paredes duplas. Nesta situação as camadas estão separadas por uma camada de ar.

A separação efetuada por uma camada de ar origina um corte hídrico que se traduz no transporte de água na fase de vapor, não ocorrendo o transporte da humidade na fase líquida.

Em termos de condições de continuidade referentes à humidade é característica a igualdade entre o fluxo que sai da camada 1 e o que entra na camada 2, ambos limitados pelo valor máximo – FLUMAX – que corresponde ao valor máximo de vapor transmitido no espaço de ar e que depende simultaneamente da pressão de vapor nas duas superfícies e da espessura desse espaço.

Quanto aos teores de humidade das camadas podem ocorrer duas situações:

- 1) Teor de humidade da camada com maior humidade é menor que o seu valor crítico;
- 2) Teor de humidade de uma das camadas é superior ao seu valor crítico.

No primeiro caso verifica-se uma continuidade na humidade relativa do espaço de ar, o que se traduz numa igualdade da humidade relativa das duas camadas.

No segundo caso o teor de humidade da restante camada tende para a humidade crítica desse material [5].

Estas condições de continuidade são evidenciadas em ambiente isotérmico e com a definição de fluxo unidirecional.

A título meramente explicativo define-se teor de humidade crítica como o teor abaixo do qual não há transporte por capilaridade e que acontece sob a influência de ambientes saturados.

A verificação do ponto 1 permite definir uma relação entre os valores do teor de humidade dos materiais na zona da interface, baseado na função  $S(\phi)$  e que se encontra na figura 2.8.

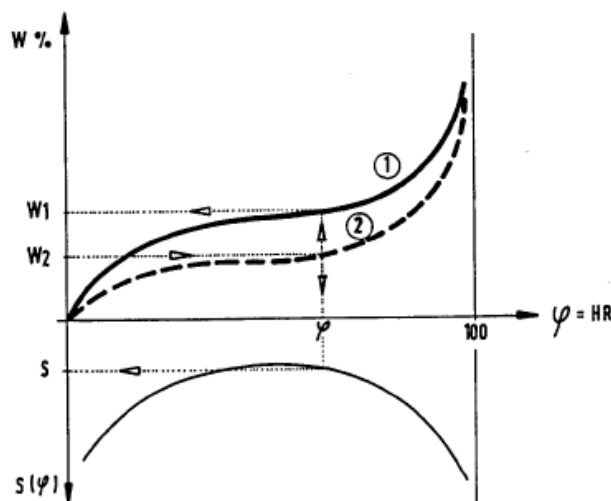


Figura 2.8. – Princípio de cálculo da função  $S(\phi)$  [2].

## 2.3. ESTUDOS REALIZADOS

Embora tenham sido efetuados vários estudos no campo do transporte de humidade poucos são aqueles que tratam detalhadamente o fenómeno da interface.

Neste contexto podem ser destacados os trabalhos dos seguintes autores: Vasco Freitas (1992), Alistair Gibb (1993-1995), H.J.P. Brocken (1998), Xiaochuan Qiu (2003), Hannelore Derluyn & Hans Janssen & Jan Carmeliet (2011) e (2012).

### 2.3.1. VASCO FREITAS – 1992

#### 2.3.1.1. Modelo adotado

Para a realização do estudo experimental o autor utilizou provetes prismáticos de dimensões  $70 \times 70 \text{ mm}^2$  e com uma altura de 200mm. Foram efetuados estudos com dois tipos de interface: espaço de ar e contacto perfeito.

Foram impermeabilizadas todas as faces, exceto duas diametralmente opostas, para assegurar o fluxo unidirecional, situação que mais se aproxima do modelo real de paredes quando se despreza a gravidade.

A figura 2.9. mostra o esquema dos provetes ensaiados.

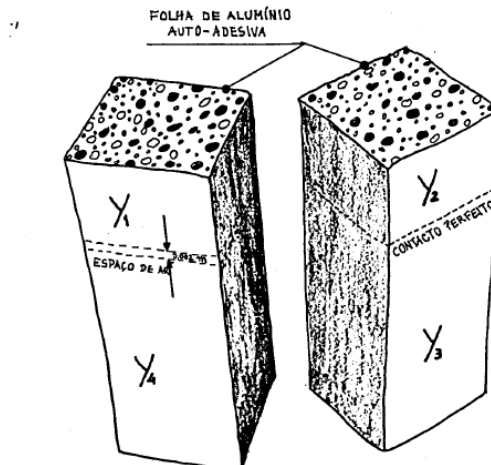


Figura 2.9. – Exemplo provetes [5].

Vasco Freitas utilizou diversas configurações onde faz variar:

- Materiais: foram ensaiados provetes de betão celular e provetes de barro vermelho;
- Interfaces: estudaram-se provetes com interface contacto perfeito e provetes com espaço de ar;
- Altura de Interface: foram ensaiados provetes com a interface a 2cm, provetes com interface a 5cm e provetes com interface a 7cm, no caso do contacto perfeito;
- Espessura do espaço de ar: foram ensaiados provetes com espessura de ar entre 2 e 4mm;
- Combinação de materiais: ensaiaram-se amostras constituídas por camadas de materiais diferentes em que uma camada era de betão celular e outra de barro vermelho.

Na tabela 2.1. apresentam-se as várias configurações estudadas pelo autor.

Tabela 2.1. – Configuração dos vários provetes ensaiados [5].

DESIG.	CONFIGURAÇÃO	DESIG.	CONFIGURAÇÃO
C1 C2 C3 C4 C5 C6		T5 AR.1 T5 AR.2 T5 AR.3	
T1 T2 T3		C5 AR.1 C5 AR.2 C5 AR.3	
T2T		T2 C.1 T2 C.2	
T5 T.1 T5 T.2 T5 T.3		T5 C.1 T5 C.2	
T7 T		C2 T.1 C2 T.2	
C2 C.1 C2 C.2		C5 T1 C5 T.2	
C5 C.1 C5 C.2		CAR C.1 CAR C.2 CAR C.3	
C7 C.1		TAR T.1 TAR T.2	

OBSERVAÇÕES:

C — — BETÃO CELULAR

⊙ — ESPAÇO DE AR COM 2 a 4 mm

T — — BARRA VERMELHA

### 2.3.1.2. O ensaio

Os provetes foram sujeitos ao ensaio de embebição vertical, após terem sido secos em estufa e até à estabilização da massa.

Apresenta-se na figura 2.10. o modelo de ensaio, assim como as condições em que este decorreu.

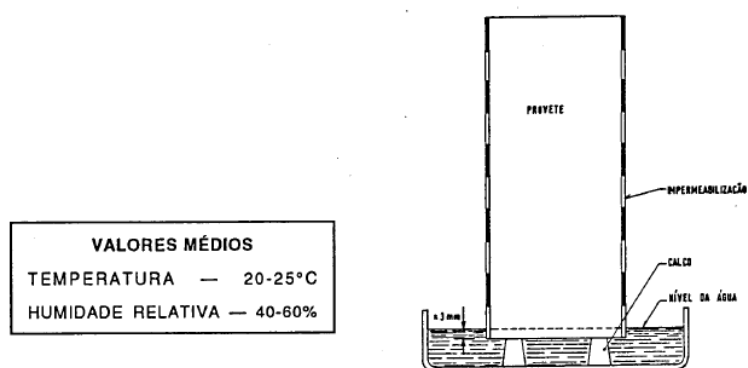


Figura 2.10. – Modelo de ensaio [5].



## 2.3.1.3. Resultados

## ➤ Elementos Monolíticos

Com os ensaios de embebição vertical, Vasco Freitas corroborou os resultados já obtidos por Bomberg [8] (utilizando gesso) que revelam uma proporcionalidade direta entre a quantidade de água absorvida e a raiz quadrada do tempo na primeira fase de embebição, como se verifica na figura 2.11.

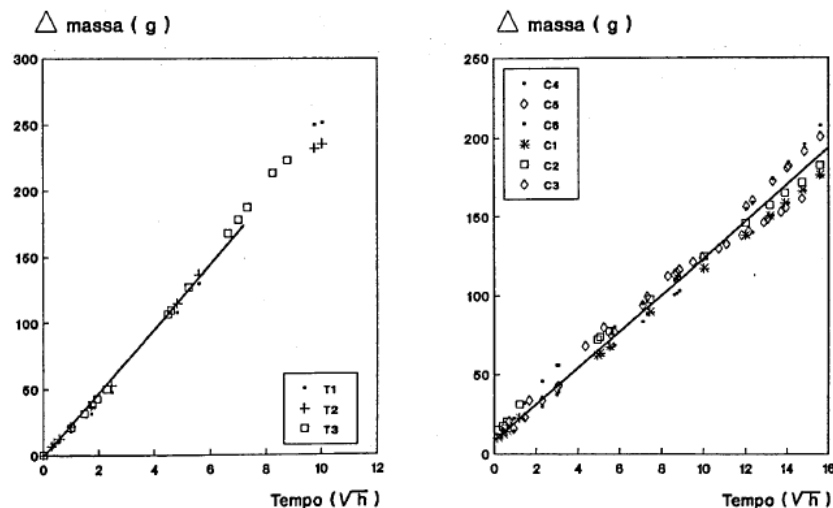


Figura 2.11. – Variação da absorção de água em provetes de barro vermelho (esquerda) e betão celular (direita) [5].

## ➤ Elementos em Contacto Perfeito

Relativamente ao barro vermelho Vasco Freitas revela a existência de uma resistência na zona da interface que se encontra associada à existência de um FLUMAX, já referido anteriormente.

Essa resistência hídrica provoca um atraso na embebição quando a interface é atingida. A partir deste ponto verifica-se um aumento de massa constante, na relação direta do tempo, como se verifica nas curvas de absorção dos provetes para as alturas de interface de 2, 5 e 7cm representadas na figura 2.12.

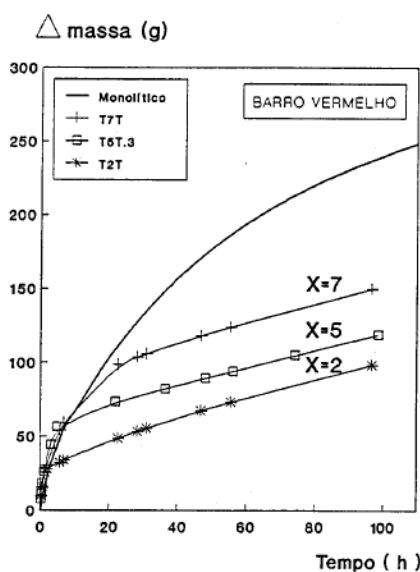


Figura 2.12. – Atraso na embebição com interfaces a diferentes alturas [5].

O atraso verifica-se em momentos temporais diferentes consoante a altura da interface. Quando a interface surge a uma posição mais baixa o atraso na embebição surge mais cedo, ou seja, quanto mais baixa a altura da interface em relação à base do provete mais rapidamente a água a atinge e, consequentemente, mais cedo se dá o atraso na embebição.

No caso dos provetes de betão celular a situação anterior só se verifica para a primeira altura, 2cm. A 5cm e a 7cm, devido ao fluxo que chega à interface ser menor que o FLUMAX, não há diferenças entre estas curvas e as correspondentes aos provetes monolíticos, como se apresenta na figura 2.13.

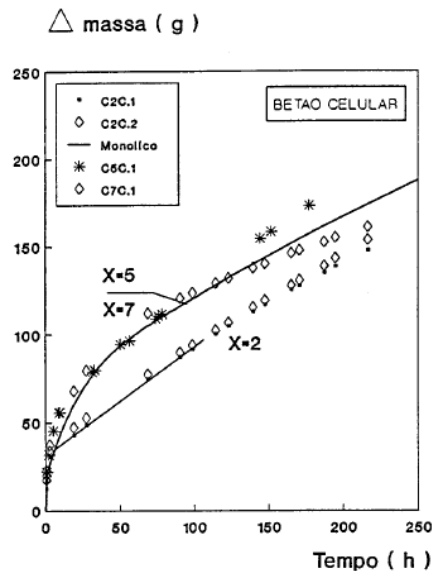


Figura 2.13. – Inexistência de atraso na embebição [5].

#### ➤ Elementos com Espaço de Ar

Foi verificada a existência de um corte hídrico na zona da interface que permite apenas a fase de vapor como forma de transporte de água.

A chegada à zona de interface pela frente húmida provoca um aumento lento, mas constante, de peso dos provetes independentemente dos materiais que os constituem, como se verifica na figura 2.14.

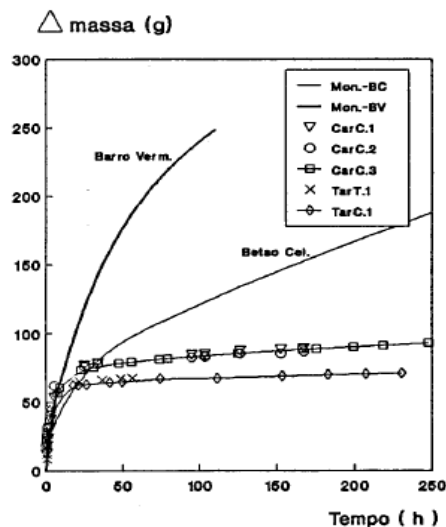


Figura 2.14. – Atraso na embebição de provetes com espaço de ar [5].

### 2.3.2. ALISTAIR GIBB – 1993 A 1995

O autor realizou durante dois anos um trabalho cujo título original é '*Testing Methods for Construction Interfaces*'. Através do resumo da sua intervenção na CIB W89 Beijing Internacional Conference verifica-se que tem como objetivo estudar a influência das interfaces na construção e na vida útil de um edifício.

O trabalho parte da hipótese colocada por Gibb, de que 'a chave para a melhoria da eficiência do design do edifício e da sua construção assenta na área de gestão das interfaces' [3]. Centra-se em revestimentos realizados à medida, nomeadamente no desenvolvimento do seu design e em testes de alta performance.

#### 2.3.2.1. O método

Foram seleccionados 15 edifícios representativos dos mais complexos revestimentos existentes.

Para o estudo desses edifícios foram realizadas entrevistas a pessoal interessado do projeto, visitas aos locais e aos trabalhos relacionados com os revestimentos, todos os testes a protótipos foram acompanhados e foi recolhida toda a documentação necessária.

#### 2.3.2.2. Modelo adotado

A partir da análise dos edifícios, que incluiu as várias etapas apresentadas anteriormente, foi sendo criada uma lista de interfaces chave relacionadas com o revestimento. Para cada edifício, representado por um número, foi verificada a existência de determinada interface e a sua influência, sendo que a preto se encontram as mais influentes e a cinzento as de menor influência. A figura 2.15. apresenta todas as interfaces encontradas, os edifícios em que foram encontradas e a sua importância.

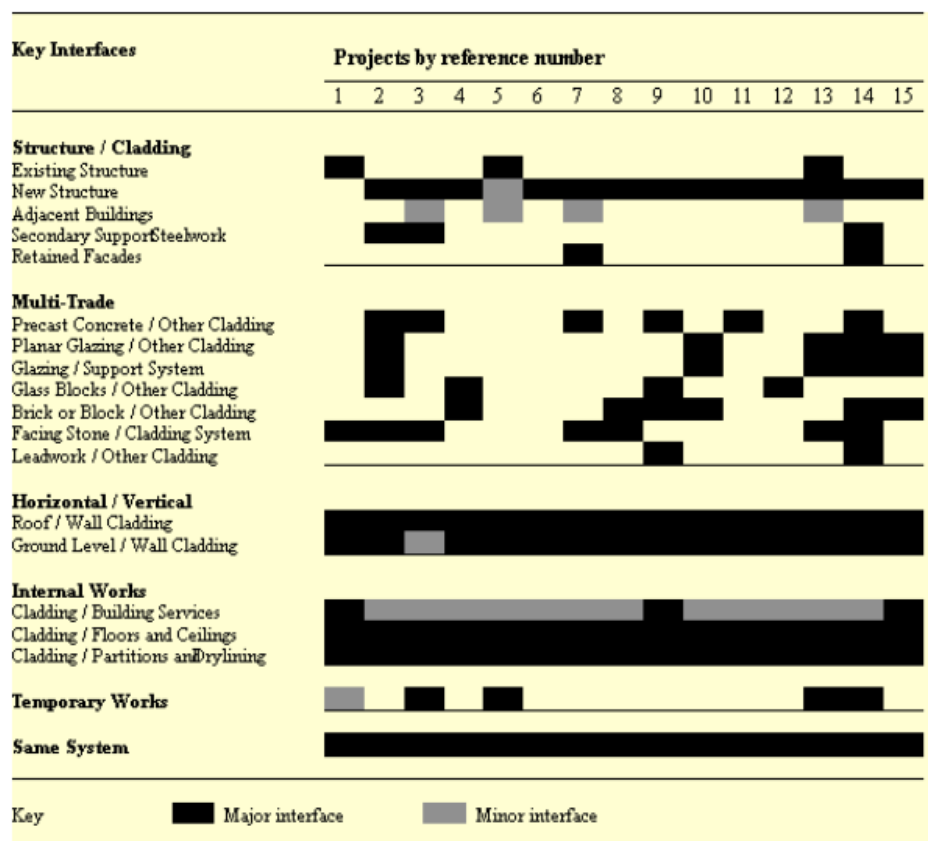


Figura 2.15. – Interfaces chave estudadas [3].

### 2.3.2.3. Resultados

A partir da análise das interfaces existentes e da sua presença nos vários edifícios estudados, o autor concluiu que:

- Nos projetos de construção mais complexos a maior parte dos problemas estão concentrados nas zonas de interface;
- Não deve haver tolerância no projeto e na concretização de interfaces na estrutura do edifício pois pode vir a ser uma fonte de problemas;
- Diferentes países com diferentes culturas apresentam diferentes atitudes perante o fenómeno da interface e os problemas por este causados;
- Ter em conta o fenómeno da interface é essencial na gestão do desenvolvimento, testes e fases da construção;
- Fazer um esforço na parte inicial da conceção do projeto é útil e influencia a redução de problemas que possam vir a ser encontrados mais tarde.

### 2.3.4. H.J.P. BROCKEN – 1998

#### 2.3.4.1. Modelo adotado

##### ➤ Provetes Monolíticos

O autor utilizou provetes cilíndricos com 2cm de diâmetro e cerca de 75mm de comprimento de tijolo vermelho.

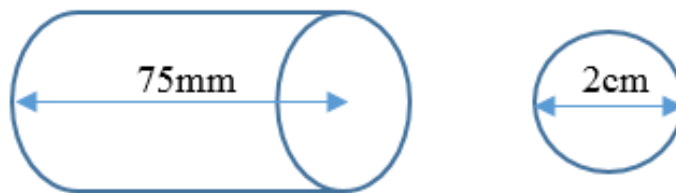


Figura 2.16. – Modelo físico do contacto perfeito.

##### ➤ Provetes Contacto Perfeito

Usando o mesmo modelo físico dos provetes monolíticos, Brocken dividiu o provete em metades que foram posteriormente justapostas.

##### ➤ Provetes Contacto Hidráulico

O modelo físico adotado para o estudo da interface de contacto hidráulico consiste num conjunto de 4 amostras de tijolo separadas por camadas de argamasse com espessura de 12mm, conforme apresentado na figura 2.17.

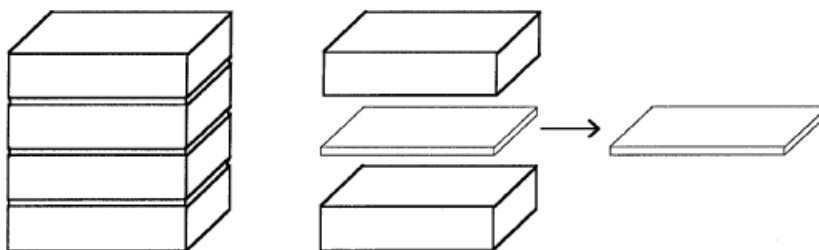


Figura 2.17. – Modelo físico de contacto hidráulico [9].

#### 2.3.4.2. O ensaio

O autor optou pelo NMR – Nuclear Magnetic Resonance, representado na figura 2.18. que permite determinar, a uma dimensão, perfis de conteúdo de humidade quantitativamente e com elevada resolução espacial.

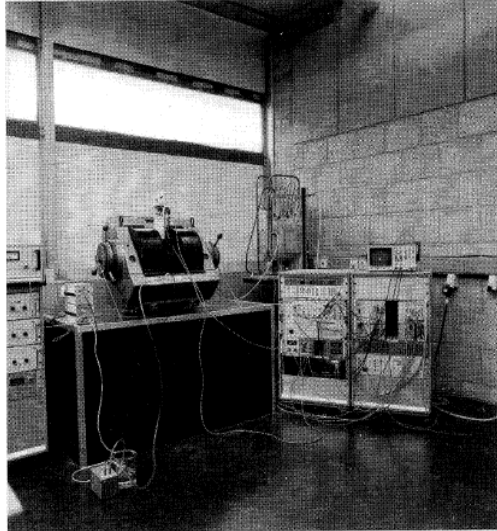


Figura 2.18. – Material necessário à realização do NMR [9].

Este método, ao efetuar perfis de humidade, permitiu com um só material retirar perfis a utilizar para a obtenção de parâmetros caraterísticos do transporte de humidade e, com vários materiais, utilizar os perfis para caraterizar o processo de transporte de humidade ou a eficiência de um tratamento que lhes esteja a ser aplicado.

Os perfis são definidos através da medição em diferentes locais do teor de humidade. Esta medição pode ser realizada através de dois métodos:

- 1) Variação da localização da amostra;
- 2) Variação do local de medição;

O ensaio encontra-se esquematizado na figura 2.19. A amostra é colocada sob um campo magnético de rádio frequência gerado por uma bobina que a rodeia e que recebe as frequências emitidas pela amostra.

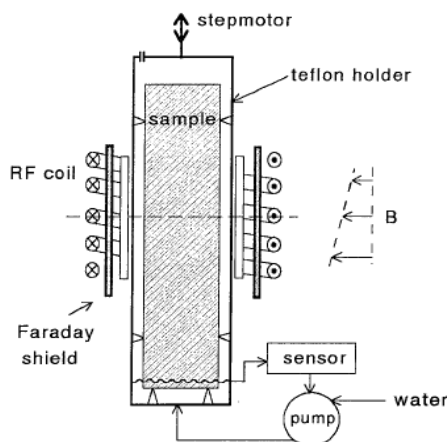


Figura 2.19. – Esquema do ensaio NMR [9].

Gera-se um gradiente de campo magnético bem definido que dá origem a uma medição unidimensional da água a uma distância de cerca de 1mm.

#### 2.3.4.3. Resultados

##### ➤ Elementos Monolíticos

O autor realizou perfis hídricos de três materiais diferentes e constatou que não há quaisquer descontinuidades a assinalar. Na apresentação dos gráficos, Brocken optou por transformar os perfis hídricos com a curva de Boltzmann, como se mostra na figura 2.20., de forma a tornar a leitura dos mesmos mais clara.

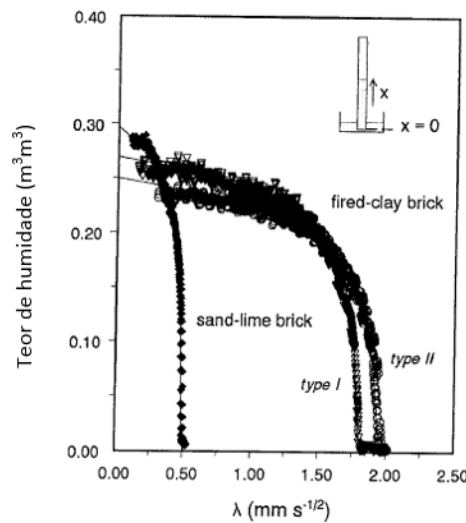


Figura 2.20. – Transformação de Boltzmann dos perfis hídricos da amostra monolítica [9].

##### ➤ Elementos em Contacto Hidráulico Perfeito

Brocken ensaiou duas amostras do mesmo tijolo ligadas entre si por uma cola e posteriormente secas. Na figura 2.21. apresentam-se os seus perfis hídricos à esquerda e a aplicação da curva de Boltzmann aos perfis do lado direito.

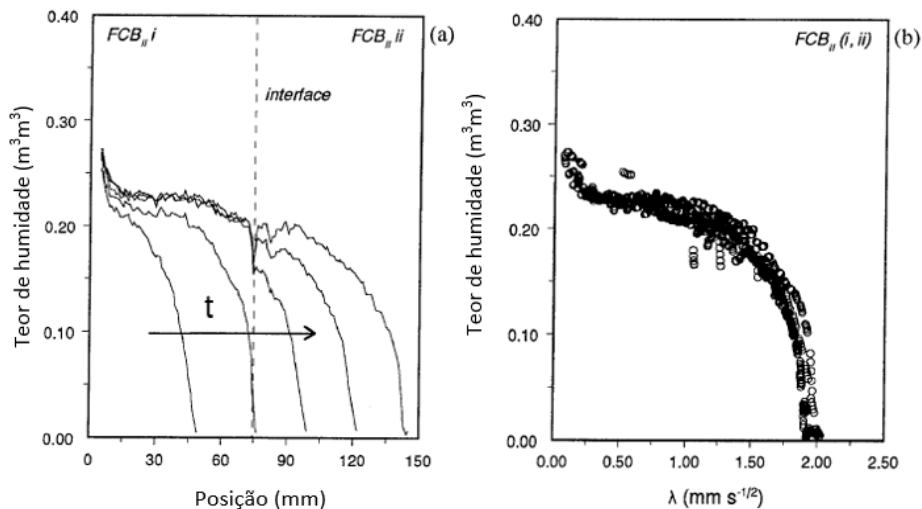


Figura 2.21. – (a) perfis hídricos de teor de humidade; (b) utilização da curva de Boltzmann nos perfis hídricos [9].

Os resultados mostram que, quando a água atinge a interface, há um pico descendente no teor de humidade que é, no entanto, muito pequeno pelo que não é representativo de uma resistência hídrica. No gráfico da curva de Boltzmann verifica-se que não há descontinuidades e o comportamento da amostra ensaiada assemelha-se a um provete monolítico, por isso considera-se um caso de contacto hidráulico perfeito. Esta situação ocorre pela ligação perfeita criada entre a cola e o tijolo que faz com que a diferença de porosidade não se traduza numa resistência hídrica na absorção de água.

#### ➤ Elementos em Contacto Hidráulico

A análise da figura 2.22., que apresenta os perfis hídricos dos provetes em contacto hidráulico, permite verificar que rapidamente a água atinge a primeira interface, fazendo com que os perfis hídricos se desenvolvam dentro da camada de argamassa (faixa cinzenta). Pelo facto de a argamassa absorver água muito lentamente, o primeiro tijolo (primeira faixa branca) atinge a saturação num curto espaço de tempo. Quando a água atinge a segunda interface, argamassa – tijolo, passa a ser absorvida pelo segundo tijolo (segunda faixa branca). A absorção de água sofre um atraso na embebição já que passa a ser controlada pela permeabilidade da primeira camada de argamassa.

Já na última camada de argamassa (segunda faixa cinzenta) não há a passagem de grande teor de humidade. Verifica-se que a água se mantém no segundo tijolo até à sua saturação. Mesmo após a saturação não há grande atravessamento da água na segunda interface tijolo-argamassa

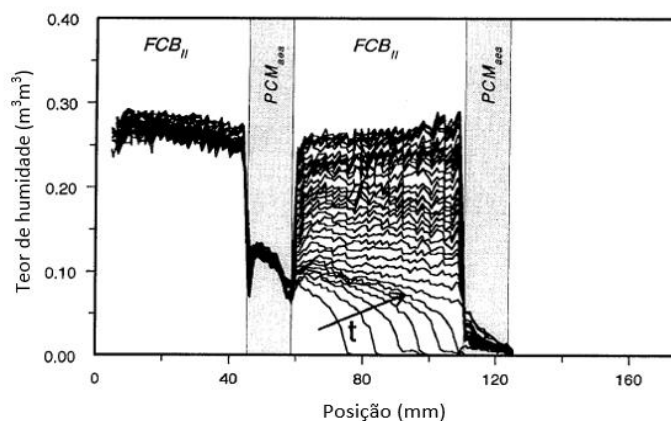


Figura 2.22. – Perfis hídricos de contacto hidráulico [9].

### 2.3.5. XIAOCHUAN QIU – 2003

#### 2.3.5.1. Modelo adotado

##### ➤ Provetes Monolíticos

O autor usou provetes cúbicos de dimensões 50\*90\*20mm de betão areado autoclavado (AAC), conforme se visualiza na figura 2.23.

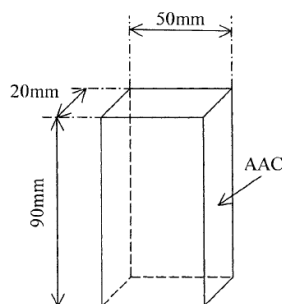


Figura 2.23. – Modelo físico monolítico [6].

### ➤ Provetes em Contacto Perfeito

Utilizando o modelo dos provetes monolíticos criaram-se os provetes com interface de contacto perfeito. Dividiu-se o provete em dois e estes foram impermeabilizados nas faces laterais e colocados em contacto nas faces cortadas (figura 2.24.)

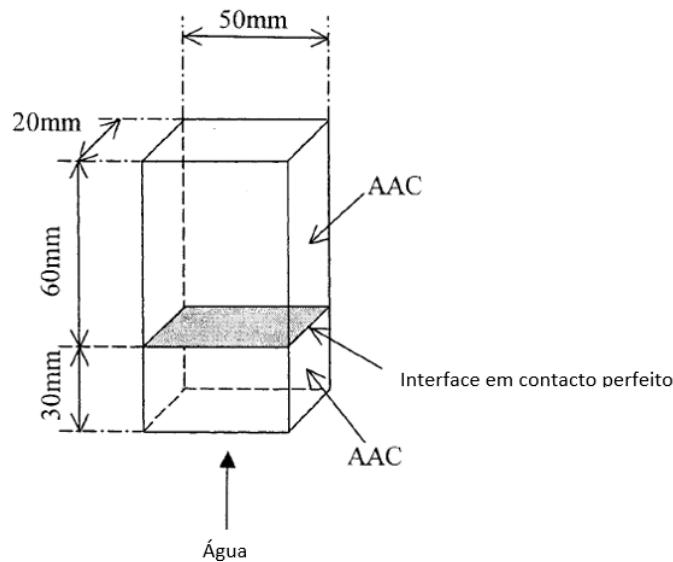


Figura 2.24. – Modelo físico com contacto perfeito [6].

### ➤ Provetes em Contacto Hidráulico

Qiu, optou por utilizar dois tipos de provetes em que a única diferença entre eles é a ligação entre o material e a argamassa. Se num deles a argamassa foi colocada diretamente entre os blocos, no outro foi colocado um tecido com uma espessura de 0.09mm que evitou a ligação entre a argamassa e o material. Este pequeno tecido foi removido ao fim de um dia e aí sim os blocos foram colocados em contacto direto com a argamassa.

Para o esquema apresentado na figura 2.25. a interface pode ser de contacto perfeito, quando se utiliza o tecido, ou de contacto hidráulico.

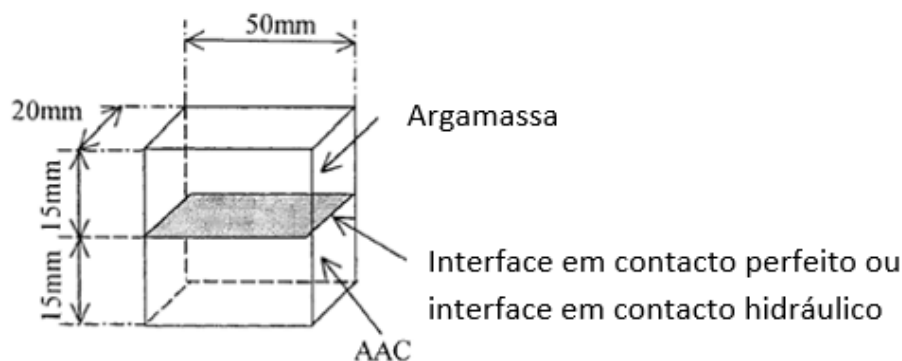


Figura 2.25. – Dois modelos físicos de contacto hidráulico [6].



➤ Resumo

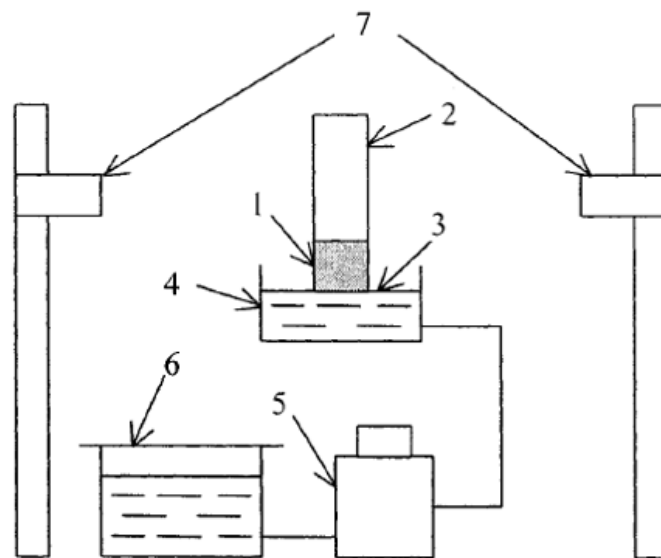
Na tabela 2.2. encontram-se descritos os vários modelos usados nos ensaios efetuados pelo autor.

Tabela 2.2. – Resumo dos modelos ensaiados por Qiu.

Amostra	A	B	C	D
Primeira camada	Betão	Betão	Betão	Betão
Espessura (mm)	90	30	15	15
Interface	N/A	Contacto Perfeito	Contacto Hidráulico	Contacto Perfeito
Segunda camada	N/A	Betão	Argamassa	Argamassa
Espessura (mm)		60	15	15

2.3.5.2. O ensaio

O ensaio utilizado pelo autor encontra-se esquematizado na figura 2.26. A superfície inferior foi colocada em contacto com água líquida, colocada em circulação pelo banho líquido. No recipiente a água foi mantida a uma altura variável entre os 3mm e os 5mm, altura essa controlada pelo recipiente número 6.



1 – Material 1

5 – Banho líquido

2 – Material 2

6 – Recipiente com água

3 – Água

7 – Espectrómetro raios gama

4 – Recipiente com água

Figura 2.26. – Esquema do ensaio [6].

Na tabela 2.3. encontram-se compilados todos os ensaios que o autor efetuou. Qiu utilizou todas as amostras e foi variando a camada posta em contacto com a água.

Tabela 2.3. – Totalidade de ensaios efetuados.

Número do Teste	Amostra	Material em contacto com a água
1	A	Betão
2	B	Betão (30mm)
3	C	Betão
4	C	Argamassa
5	D	Betão
6	D	Argamassa

### 2.3.5.3. Resultados

Embora com um material diferente, tal como Vasco Freitas em 1992 [5] e Brocken em 1998 [9], Xiaochuan Qiu aferiu a existência de contacto hidráulico imperfeito. Na figura 2.27. encontram-se vários perfis hídricos do provete monolítico.

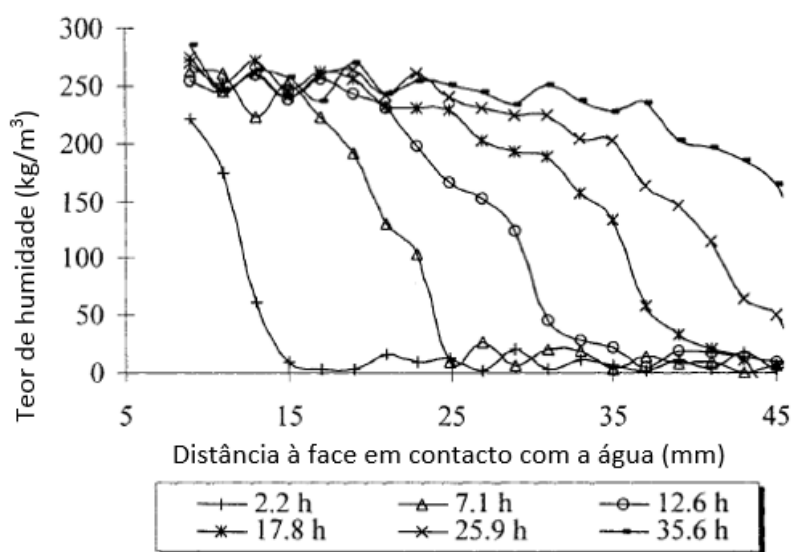


Figura 2.27. – Perfil Hídrico do provete monolítico (A) [6].

Verifica-se uma continuidade na absorção de água por parte do provete ao longo do tempo, sendo visível o maior teor de humidade junto à base em contacto com a água e a diminuição contínua do mesmo à medida que a distância à base aumenta.

No caso dos perfis hídricos relativos à interface em contacto hidráulico, representados na figura 2.28. verifica-se que, quando a água atinge a interface (linha vertical), há um decaimento do teor de humidade e um atraso na absorção de água com origem na resistência hídrica introduzida pela descontinuidade da estrutura porosa. Esta descontinuidade ocorre por não haver interpenetração da estrutura porosa.

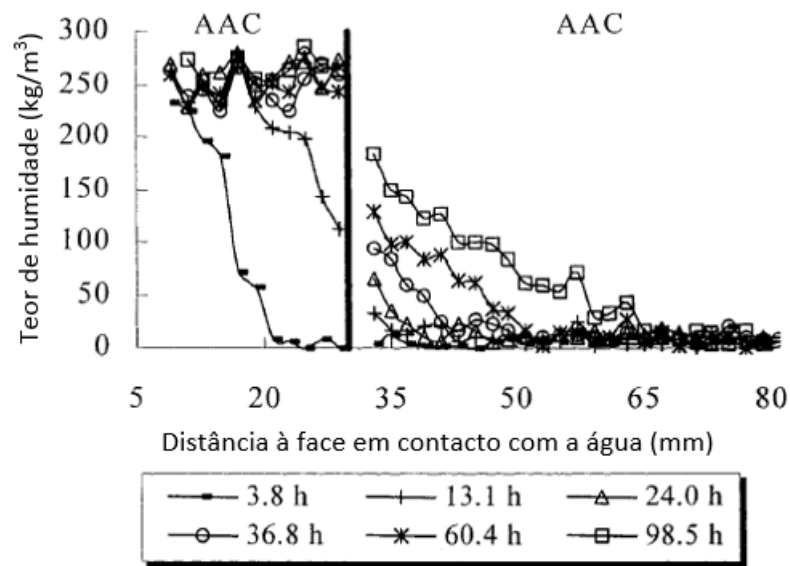


Figura 2.28. – Perfil hídrico do provete de contacto perfeito (B) [6].

Caso se verificasse contacto hidráulico perfeito, os dois perfis coincidiriam e a absorção de água seria efetuada do mesmo modo ao longo do tempo, mas os perfis hídricos mostram uma alteração do comportamento no transporte da água quando esta atinge a zona da interface no provete B.

Qiu conclui que ‘a assunção de contacto hidráulico perfeito pode resultar num erro significativo ao prever o transporte de humidade na construção de um edifício’ [6].

Nas figuras 2.29. e 2.30. estão representados os perfis hídricos dos provetes em contacto hidráulico (amostras C) e os perfis hídricos em contacto perfeito (amostras D).

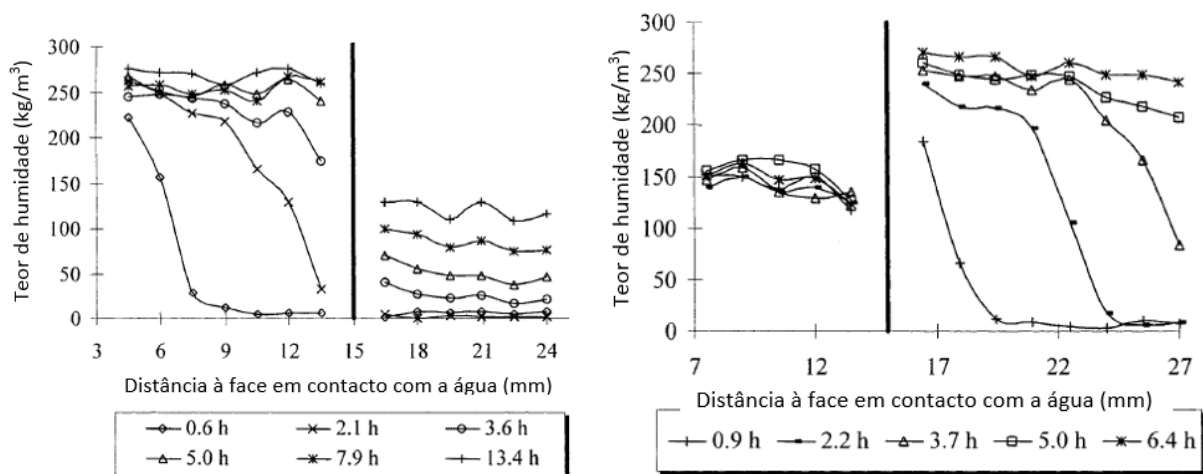


Figura 2.29. – Perfis hídricos de provetes em contacto hidráulico: betão em contacto com a água à esquerda; argamassa em contacto com a água à direita [6].

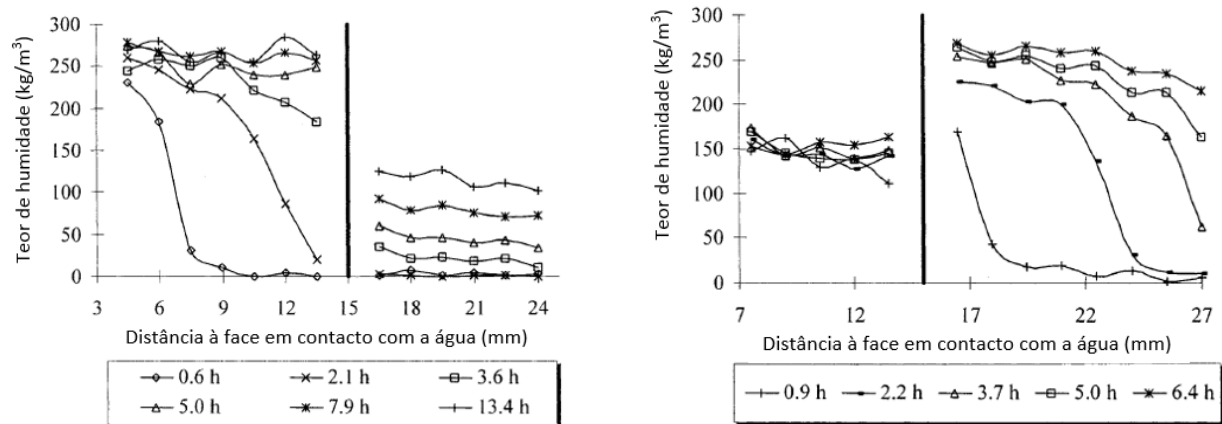


Figura 2.30. – Perfis hídricos de provetes em contacto perfeito: betão em contacto com a água à esquerda; argamassa em contacto com a água à direita [6].

A análise das figuras acima apresentadas permite concluir que, independentemente da direção do fluxo de humidade nas zonas da interface, o teor de humidade não é contínuo. No entanto, pelo facto de argamassa e betão serem materiais distintos, não é possível verificar diretamente se as ligações contacto hidráulico e contacto natural apresentam pressões capilares diferentes.

Neste ponto o autor calculou a pressão capilar através dos conhecidos valores de teor de humidade e concluiu que:

- 1) A pressão capilar numa zona de contacto hidráulico diminui com o crescimento da humidade;
- 2) O comportamento nas interfaces de contacto hidráulico e nas de contacto perfeito é semelhante quando sujeitas ao ensaio de embebição vertical.

#### 2.3.6. H. DERLUYN & H. JANSSEN & J. CARMELIET (2011)

##### 2.3.6.1. Modelo adotado

Com o modelo físico apresentado em baixo foram criados três tipos de amostras.

- 1) Contacto perfeito: tijolo – argila de caulino – argamassa curada em molde – argila de caulino – tijolo. A aplicação da argila pretende assegurar o contacto hidráulico perfeito.
- 2) Amostras com argamassa curada em ambiente saturado: resultam da junção de tijolos saturados com argamassa fresca que vai curar entre os tijolos saturados.
- 3) Amostras com argamassa curada em ambiente seco: difere da anterior apenas nos tijolos já que nesta situação estes foram secos artificialmente.

Estas duas últimas amostras representam os limites de interesse do estudo, ou seja, os tijolos saturados e os tijolos completamente secos.

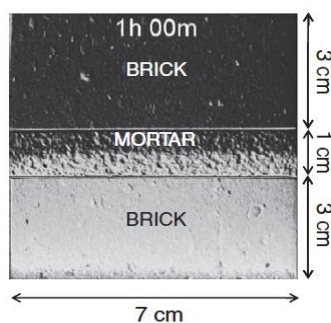


Figura 2.31. – Modelo físico adotado [4].

### 2.3.6.2. O ensaio

As amostras foram sujeitas ao ensaio de embebição vertical com as faces laterais impermeabilizadas para assegurar o fluxo unidirecional.

A subida da água foi medida através do método da projeção de raios x. A quantificação do teor de humidade foi feita através da comparação entre a imagem retirada da projeção de raios x e a imagem da amostra seca, sendo que a atenuação no feixe de raios x entre estes dois casos é transformada no teor de humidade da amostra ensaiada.

### 2.3.6.3. Resultados

Na imagem 2.32. estão representados perfis hídricos retirados do interior da argamassa para as três amostras de provetes: provetes com argamassa curada em molde, tijolos secos e tijolos saturados.

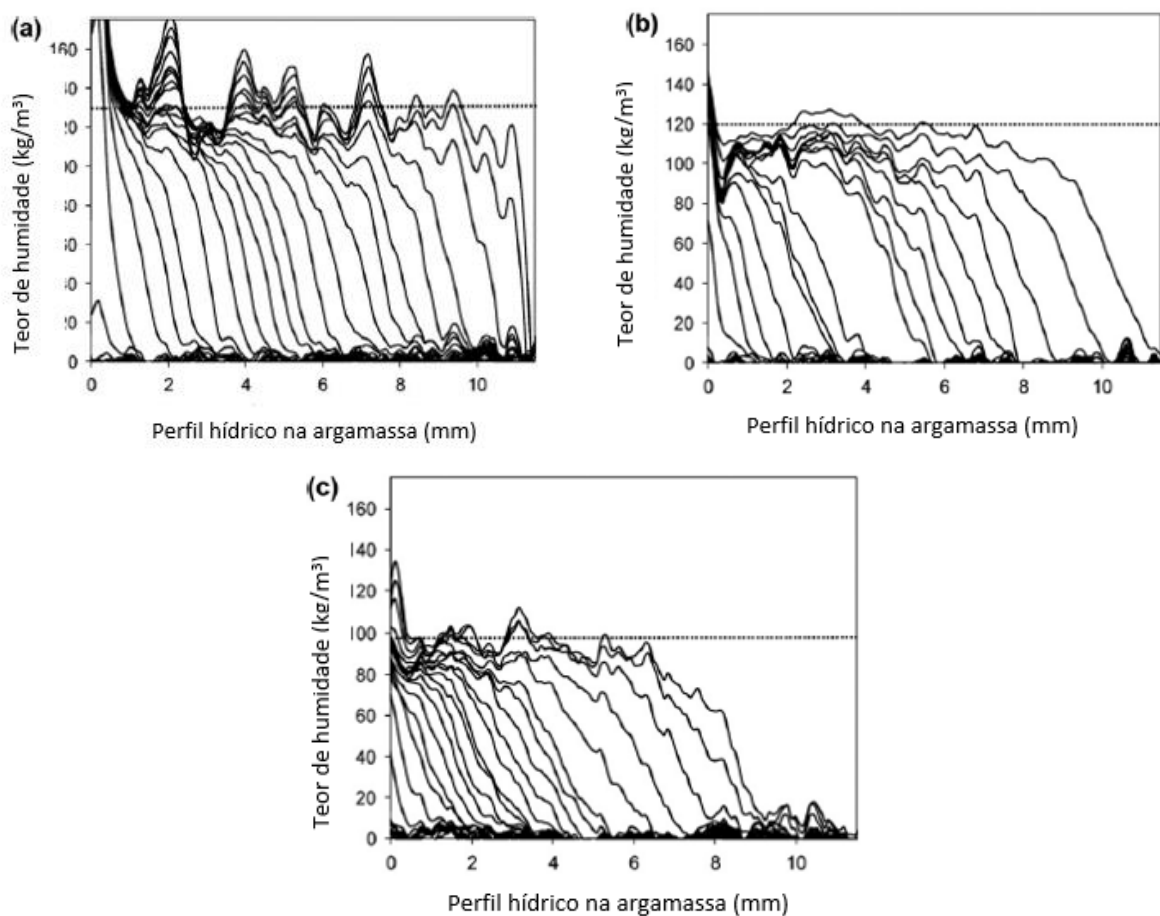


Figura 2.32. – Perfis hídricos no interior da argamassa: (a) argamassa curada em molde; (b) tijolos saturados; (c) tijolos secos [4].

Nestes três perfis hídricos os autores observaram o seguinte:

- O processo de embebição é mais rápido nas amostras que contêm a argamassa curada em molde;
- Entre as restantes, o processo nas amostras com a argamassa curada em ambiente húmido é mais rápido e nas amostras com a argamassa curada em ambiente seco é mais lento, sendo ambas mais lentas que as amostras referidas no ponto anterior. Estas duas observações permitem concluir que as condições de cura da argamassa influenciam o comportamento dos materiais no transporte de humidade.

Com o intuito de estudar a capilaridade mais aprofundadamente, os autores calcularam o fluxo de humidade através das interfaces na argamassa, o que lhes permitiu concluir que:

- Nas amostras com a argamassa curada em molde o fluxo traduz-se por uma curva não linear que apresenta um crescimento inicial muito rápido, mas que vai diminuindo até se tornar um crescimento praticamente linear com o passar do tempo;
- Nas amostras com a argamassa curada em ambiente saturado há apenas um aumento inicial de fluxo que rapidamente se desvanece e que se torna linear, fazendo com o que o comportamento destas amostras tenda para o comportamento das amostras anteriores;
- Nas amostras com a argamassa curada em ambiente seco não há um aumento inicial rápido observável. O crescimento da curva dá-se de forma linear e é mais lento que o das outras amostras.

Na figura 2.33. apresenta-se o gráfico com a comparação das curvas supracitadas.

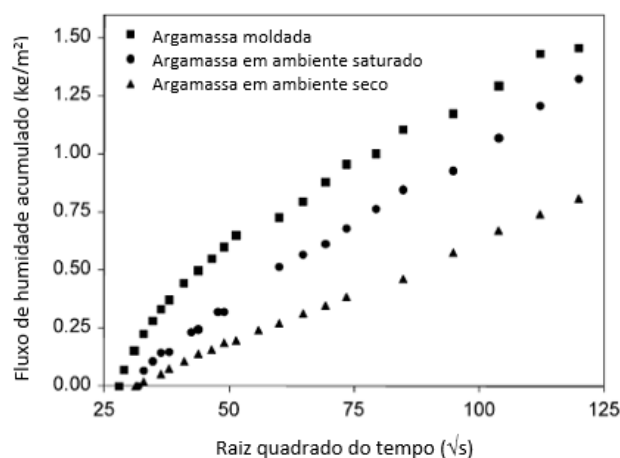


Figura 2.33. – Curvas do fluxo da humidade pela raiz quadrado do tempo [4].

#### 2.3.7. H. DERLUYN & H. JANSSEN & J. CARMELIET (2012)

Este trabalho surge na sequência do trabalho descrito no subcapítulo anterior e tem como objetivo complementá-lo.

É efetuada uma análise alternativa que confirma os resultados anteriores e os valida de forma quantitativa e qualitativa.

##### 2.3.7.1. Modelo adotado

Na figura 2.34. está esquematizado o modelo físico ensaiado.

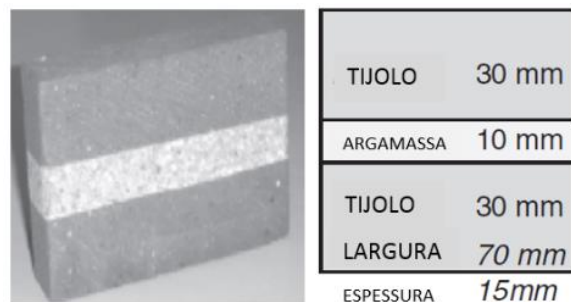


Figura 2.34. – Modelo físico das amostras [10].

A partir do modelo físico foram definidos três tipos de amostras:

- 1) Com a argamassa moldada: a argamassa fresca é colocada num molde ocorrendo a sua cura;
- 2) Com a argamassa curada em ambiente saturado: resultam da junção de tijolos cerâmicos saturados com argamassa fresca que vai curar entre os tijolos saturados.
- 3) Com a argamassa curada em ambiente seco: difere da anterior apenas nos tijolos já que nesta situação estes foram secos artificialmente.

#### 2.3.7.2. O ensaio

Tal como no trabalho anterior os autores optaram pelo ensaio de embebição vertical em que a leitura da subida da água se processa através dos raios x. No entanto, os resultados são analisados sob a teoria ‘Sharp-Front’ que permite transformar ténues frentes de humidades em grandes separações entre a parte seca e a parte húmida do material.

#### 2.3.7.3. Resultados

Várias conclusões foram tiradas no final deste trabalho que relacionam o transporte da humidade com as características das argamassas e as suas condições de cura, nomeadamente:

- 1) As propriedades hígricas medidas durante os ensaios são diferentes nas argamassas moldada e na argamassa curada entre tijolos;
- 2) Existe uma resistência na interface tijolo-argamassa;
- 3) O teor de humidade e o coeficiente de absorção capilares têm um comportamento inverso à secagem da argamassa durante a cura e decrescem desde a argamassa moldada até à argamassa curada em ambiente seco.
- 4) A resistência na zona da interface é proporcional ao decréscimo do teor de água da argamassa durante a cura e cresce desde a argamassa moldada até à argamassa curada em ambiente seco.

### 2.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Para satisfazer as várias exigências da construção, os elementos construtivos são heterogéneos e compostos por materiais de diferentes porosidades. Posto isto é necessário conhecer as condições de continuidade das camadas para o estudo de transporte de humidade em edifícios.

Existem três configurações de interface na construção: o contacto perfeito, o contacto hidráulico e o espaço de ar entre camadas.

O contacto perfeito ocorre quando duas camadas são justapostas, de forma ao seu contacto ser perfeito, mas sem interpenetração da estrutura porosa. A descontinuidade da estrutura porosa origina uma resistência hídrica quando a água atinge a interface que se traduz num atraso da embebição. Há, no entanto, a chegada da água à segunda camada.

O contacto hidráulico é caracterizado pela existência de interpenetração porosa das duas camadas, que dá continuidade à estrutura. A ligação mais comum é a tijolo – argamassa das alvenarias. Os materiais secos, quando contactam com a argamassa que tem um elevado teor de humidade, tendem a absorver água dessa camada. Essa absorção altera as condições iniciais de continuidade e cria uma resistência hídrica que se traduz num atraso da embebição da água, quando esta atinge a interface.

No espaço de ar há um corte hídrico que inibe o transporte de água líquida e este passa a ser feito somente em fase de vapor.

Na tabela 2.4. encontram-se resumidas as interfaces e as suas condições de continuidade.

Tabela 2.4. – Condições de continuidade na interface [5].

	CONTINUIDADE HIDRÁULICA	CONTACTO PERFEITO	ESPAÇO DE AR ENTRE CAMADAS (REGIME ISOTÉRMICO)
CONFIGURAÇÃO DO CONTACTO			
CONDIÇÕES DE CONTINUIDADE	$\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \Big _1 = \lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \Big _2$ $T_1 = T_2$ $\rho_1 (Dw_1 \frac{\partial W}{\partial x} \Big _1 + Dt_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big _1) = \rho_2 (Dw_2 \frac{\partial W}{\partial x} \Big _2 + Dt_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big _2) \leq FLUMAX$ $W_1 = W_2 \text{ (Pc)}$	$\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \Big _1 = \lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \Big _2$ $T_1 = T_2$ $\rho_1 (Dw_1 \frac{\partial W}{\partial x} \Big _1 + Dt_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big _1) = \rho_2 (Dw_2 \frac{\partial W}{\partial x} \Big _2 + Dt_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big _2) \leq FLUMAX$ $W_1 \neq W_2$	$\rho_1 (Dw_1 \frac{\partial W}{\partial x} \Big _1 + Dt_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big _1) = \rho_2 (Dw_2 \frac{\partial W}{\partial x} \Big _2 + Dt_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big _2) \leq FLUMAX$ $Se W \leq W_{cr}, W_1 = W_2 \cdot S$ $Se W \geq W_{cr}, W_2 = W_{cr}$

Neste capítulo foram, ainda, analisados vários estudos sobre o fenómeno da interface.

Vasco Freitas [5] revelou a proporcionalidade direta entre a quantidade de água absorvida e a raiz do tempo nos provetes monolíticos. No seu estudo das interfaces em contacto perfeito e espaço de ar concluiu que existe uma resistência hídrica associada ao FLUMAX, fluxo máximo transmitido, e um corte hídrico, respetivamente, que geram um atraso na embebição dos provetes.

Alistair Gibb [3], num estudo mais direcionado para revestimentos fez um levantamento das interfaces mais críticas no processo construtivo de revestimentos e concluiu que as zonas de interfaces são zonas de concentração de problemas complexos e que a gestão das interfaces reduz o risco de aparecimento de patologias e prolonga a vida útil do edifício.

Brocken [9] ensaiou amostras cujos resultados corroboram a existência de contacto perfeito. Quanto ao contacto hidráulico, o autor considera que só pode existir contacto hidráulico perfeito dentro de um intervalo limitado dos parâmetros da argamassa que influenciam o transporte de humidade, já que estes determinam o comportamento da interface.

Tal como Vasco Freitas [5], Qiu [6] corroborou a existência de contacto hidráulico imperfeito devido à descontinuidade da estrutura porosa que provoca um decaimento do teor de humidade dos perfis hídricos na zona da interface. Concluiu que a pressão capilar, em zonas de contacto hidráulico, diminui com o aumento da humidade e que o comportamento de provetes compostos por tijolo e argamassa em contacto hidráulico e em contacto perfeito é semelhante quando sujeitos ao ensaio de absorção de água por capilaridade.

H. Derluyn, H. Janssen e J. Carmeliet [4]/[10] concluíram que a cura das argamassas influencia o transporte de humidade. A absorção é mais rápida nas amostras com argamassa curada em molde, seguidas pelas amostras com argamassa curada em ambiente húmido e pelas amostras com argamassa curada em ambiente seco.



## 3. O MODELO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA: WUFI 2D

### 3.1. INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico sentido nas últimas décadas tem dado origem ao aparecimento de inúmeros programas de cálculo que se têm mostrado extremamente úteis no auxílio e até na própria resolução de problemas ligados à Engenharia Civil. Ao permitirem simulações rápidas e simples são uma ferramenta essencial na escolha dos materiais a utilizar, assim como na prevenção e caracterização de fenómenos que possam ocorrer nas mais variadas condições passíveis de serem simuladas e que de outra forma não poderiam ser previstos. Estes programas de simulação tornam-se úteis na medida em que estimulam a criação de métodos de prevenção e/ou tratamento dos vários fenómenos estudados, situação que tem vindo a contribuir para uma construção mais consciente, mais fundamentada em termos técnicos e mais sustentável.

A interface, enquanto elemento integrador de vários componentes de construção e edifícios, surge como um importante objeto de estudo fazendo com que os softwares, pela facilidade de criação de várias interfaces, em vários contextos, condições, materiais e climas sejam a escolha de excelência para a análise deste mesmo fenómeno.

Numa pesquisa mais aprofundada sobre programas de cálculo automático no âmbito da construção, o site do Departamento da Energia americano fornece uma lista exaustiva dos vários softwares existentes atualmente [11] que permitem a simulação no âmbito da eficiência energética, das energias renováveis e da sustentabilidade.

Diversos modelos de cálculo tendo em conta o transporte conjunto de calor, ar, humidade e transporte de sais têm sido desenvolvidos e incorporados em diversos programas informáticos aplicados na área dos materiais porosos utilizados na construção. Os modelos de calor, ar e humidade (HAM) combinam as equações de fluxo com os balanços de massa e energia [12].

No contexto deste trabalho podem ser destacados os seguintes programas por permitirem uma simulação em mais do que uma dimensão e estarem acessíveis gratuitamente:

- DELPHIN: Ferramenta de simulação numérica para o transporte combinado de calor e humidade em materiais porosos de construção. É aplicado, sobretudo, para calcular processos transitórios, em fachadas e detalhes construtivos e prever problemas de condensações e riscos de durabilidade em geral [13].
- MOIST: Programa para prever transferência combinada de calor e humidade em construção multicamada. Introduce dados de clima de hora a hora e prevê o teor de humidade e a temperatura das camadas construídas como função de tempo de um ano. Pode ser utilizado para desenvolver orientações e práticas para controlar humidade em paredes, telhados planos e tetos [14].

- WUFI-ORNL/IBP: Modelo higrotérmico avançado que resolve a ligação entre o transporte de calor e humidade nos sistemas da envolvente dos edifícios como paredes e tetos. O modelo foi desenvolvido especificamente para arquitetos e engenheiros. É uma excelente ferramenta educacional pois o utilizador pode rever visualmente a distribuição transitória térmica e de humidade enquanto a simulação é executada [15].

A opção recaiu sobre o WUFI 2D, versão 2.1, já que é um software comercializado em Portugal e Espanha pelo Laboratório de Física das Construções sendo este último Parceiro Internacional de Cooperação do “Fraunhofer Institut für Bauphysik” – Fraunhofer Institut for Building Physics – IBP, instituição onde foi criado o programa.

O WUFI-2D, acrónimo para “Wärme- und Feuchtetransport instationär” - “Transporte de calor transiente e humidade” permite uma análise bidimensional da transferência de calor e humidade, em regime transiente, nos materiais de construção. É um software para simulação da transferência de humidade e calor em elementos construtivos. Permite simulações realistas da influência da variação higrotérmica para diferentes elementos construtivos e condições climáticas [16]. Foi desenvolvido por Künzle, H.M. e baseia-se no método dos volumes finitos que permite a modelação de elementos de construção com geometrias complexas. Tem, no entanto, algumas limitações no que diz respeito à consideração de condições fronteira variáveis ao longo da superfície dos elementos de construção, bem como das interfaces entre materiais [17].

O cálculo automático assenta no seguinte modelo desenvolvido por Hartwig Künzle [18] e [19] no qual a primeira equação (3.1) se refere ao transporte de calor e a segunda equação (3.2) ao transporte da humidade [20]:

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_v \nabla(\delta_p \nabla(\phi \cdot p_{sat})) \quad (3.1)$$

$$\frac{dw}{d\phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla(D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla(\phi \cdot p_{sat})) \quad (3.2)$$

em que:

$dH/dT$ - [J/m <sup>3</sup> ]	Capacidade de armazenamento de calor, material húmido,
$dw/d\phi$ - [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacidade de armazenamento de humidade, material húmido;
$\lambda_w$ - [W/(m.K)]	Condutibilidade térmica do material húmido;
$D_\phi$ - [kg/(m.s)]	Coeficiente de condução líquida;
$\delta_p$ - [kg/(m.s.Pa)]	Permeabilidade ao vapor de água do material;
$h_v$ - [J/kg]	Calor latente de evaporação da água;
$p_{sat}$ - [Pa]	Pressão de saturação do vapor de água;
$T$ - [°C]	Temperatura do ar;
$\phi$ - [-]	Humidade relativa.

É necessário ter em conta que são ferramentas de cálculo com limitações de aplicação e, sobretudo, não dispõem de experiência prática e bom senso pelo que a sua utilização pressupõe, por parte do utilizador, o conhecimento prévio do domínio dos inputs, outputs e análise de dados para que fique salvaguardada a correção dos resultados e sua posterior aplicação a casos práticos.

O uso de programas de cálculo automático exige um conhecimento que permita ao utilizador perceber a base do seu funcionamento, viabilizando uma correta interpretação dos resultados obtidos e sua posterior análise.

### 3.2. APRESENTAÇÃO

A página de abertura do WUFI 2D é o ecrã principal onde constam todos os menus. Na figura 3.1. observa-se a apresentação geral e na figura 3.2. a descrição dos vários menus.

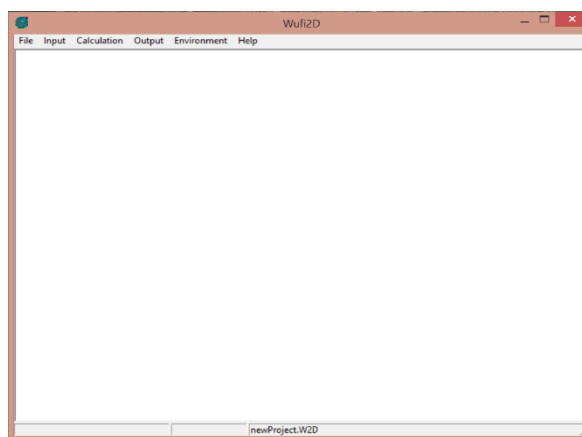


Figura 3.1. – Ecrã Principal.

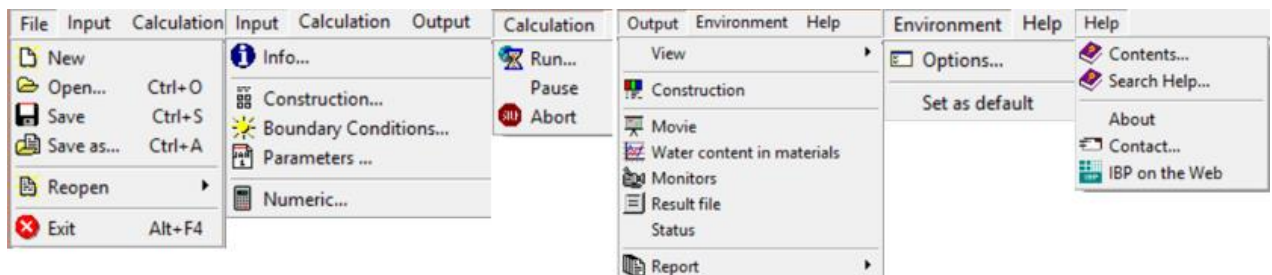


Figura 3.2. – Menus.

### 3.3. FICHEIRO

As opções mais importantes neste menu são criar um novo ficheiro, abrir um já existente e salvar na localização desejada o projeto.

### 3.4. INPUT

É aqui que se definem os pormenores do nosso projeto sejam eles dimensionais, climáticos ou materiais.

### 3.4.1. INFO

Neste submenu, representado na figura 3.3. surge uma caixa de diálogo de preenchimento opcional onde se traduz informação sobre o projeto como o nome, o autor e outras informações pessoais do autor como são exemplo a cidade e o email.

Figura 3.3. – Menu Info.

### 3.4.2. CONSTRUCTION

Nesta secção define-se o objeto de estudo do ponto de vista dimensional e associam-se os materiais que o constituem. Existem diferentes bases de dados com materiais já definidos.

Interessante também é o facto de ser possível visualizar as caraterísticas dos materiais como vários valores de propriedades básicas: densidade, porosidade, calor específico, etc, como se verifica na figura 3.4.

Figura 3.4. – Construção.

#### 3.4.2.1. Select Material

Nesta mesma janela, apresentada na figura 3.5., observam-se vários campos que são relevantes.

- Material data base
  - Language – Linguagem: permite escolher, entre as línguas disponíveis, aquela em que queremos que os menus apareçam;

- Source – Fonte: permite escolher a origem da base de dados de forma a efetuarmos uma pesquisa mais direta do material desejado;
- Catalog – Catálogo: tem a mesma função de “source” mas aqui os materiais encontram-se agrupados por características.
- Available materials – Apresenta todos os materiais que existem ou, no caso de se ter filtrado através do “source” e/ou do “catalog”, os materiais que correspondem à pesquisa.
- Selected materials – Lista dos materiais selecionados para utilizar no projeto. Aparecem no retângulo quando selecionados da lista de “available materials”. É possível eliminar um determinado material.
- Basic properties – Mostra algumas propriedades higrotérmicas do material selecionado.

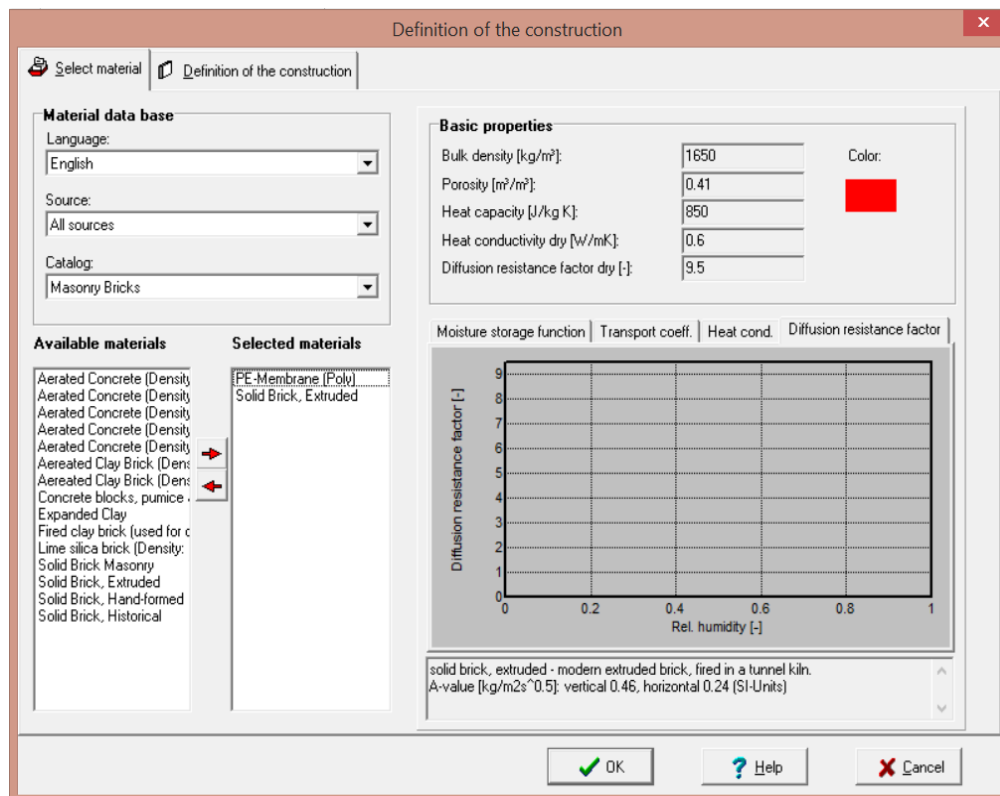


Figura 3.5. – Selecionar material.

#### 3.4.2.2. Definition of the construction

Na figura 3.6, definição da construção, introduzem-se as dimensões do objeto.

- X direction – definição das dimensões e do número de elementos na direção horizontal;
- Y direction – definição das dimensões e do número de elementos na direção vertical.

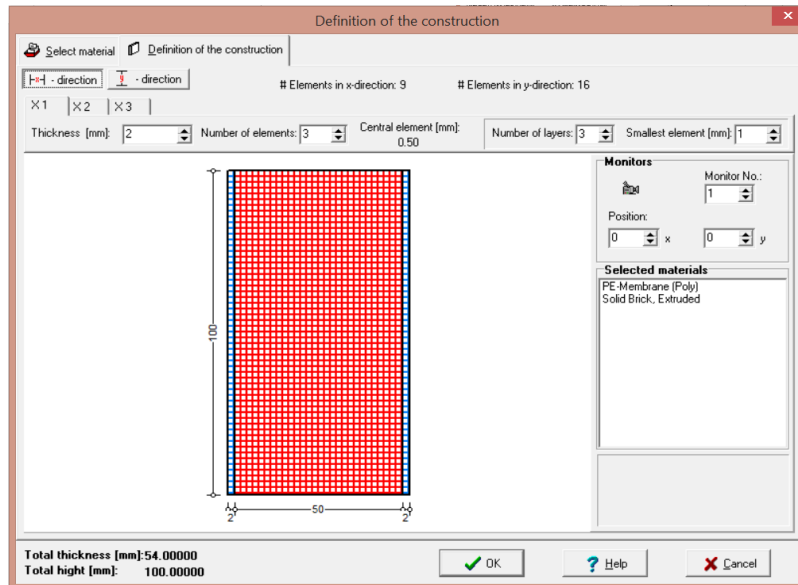


Figura 3.6. – Definição da construção.

Como foram definidas três camadas na direção horizontal (“Number of layers”) surgem as referências X1, X2 e X3 que tratam individualmente das dimensões de cada retângulo definido.

Na janela “selected materials” aparecem os materiais colocados na lista homónima do submenu anterior. Basta clicar sobre um deles e de seguida clicar na camada a que o queremos associar e assim sucessivamente até estarem todos os materiais associados ao objeto definido.

### 3.4.3. BOUNDARY CONDITIONS

Menu referente às condições fronteira da simulação.

#### 3.4.3.1. Surface Transfer

Nesta janela definem-se as condições fronteira para cada superfície em termos de coeficiente de transferência de calor, emissividade e outros visíveis na imagem 3.7. Neste projeto, por este pretender recriar os ensaios laboratoriais, vai ser atribuído o valor zero a todos os coeficientes por estes não influenciarem os resultados. As superfícies encontram-se associadas aos pontos cardeais e podem ser criadas individualmente selecionando o ponto cardinal correspondente, como representado na figura 3.7.

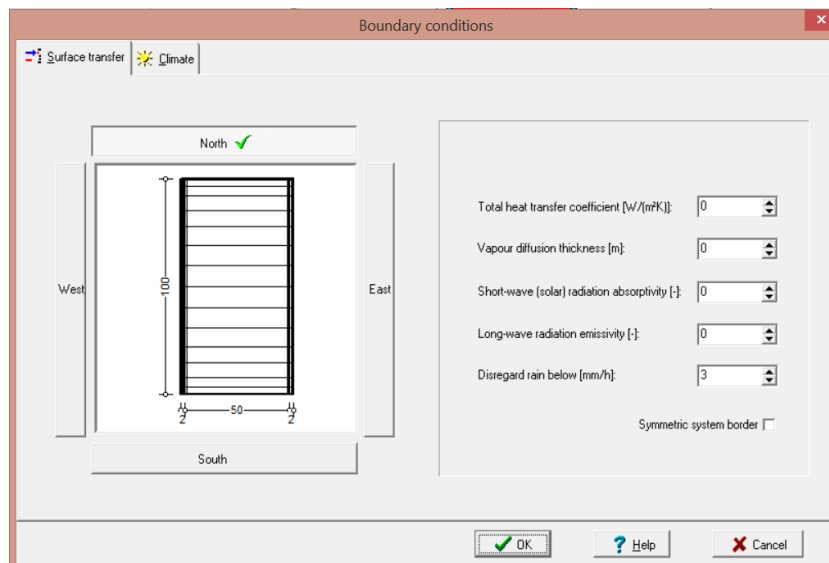


Figura 3.7. – Definição da superfície.

### 3.4.3.2. Climate

Em climate, menu apresentado na figura 3.8., é gerado o ambiente de cada superfície através da definição dos valores de temperatura e humidade relativa clicando no botão “Simulate climate”.

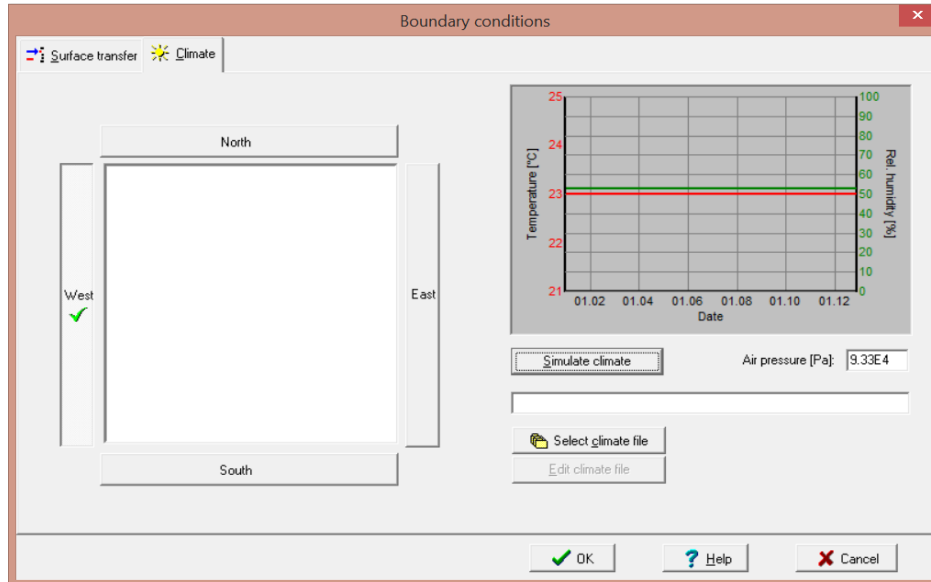


Figura 3.8. – Clima.

Para este projeto tanto a temperatura como a humidade relativa são constantes nas superfícies laterais e superiores, com valores de 23°C e 53% respetivamente.

Na base, e tendo como objetivo final simular um ensaio de embebição vertical, utiliza-se um artifício que consiste em colocar uma humidade relativa de 101% ao que o programa assume a existência de água líquida nessa fronteira, como representado na figura 3.9. A temperatura mantém-se constante com valor de 23°C.

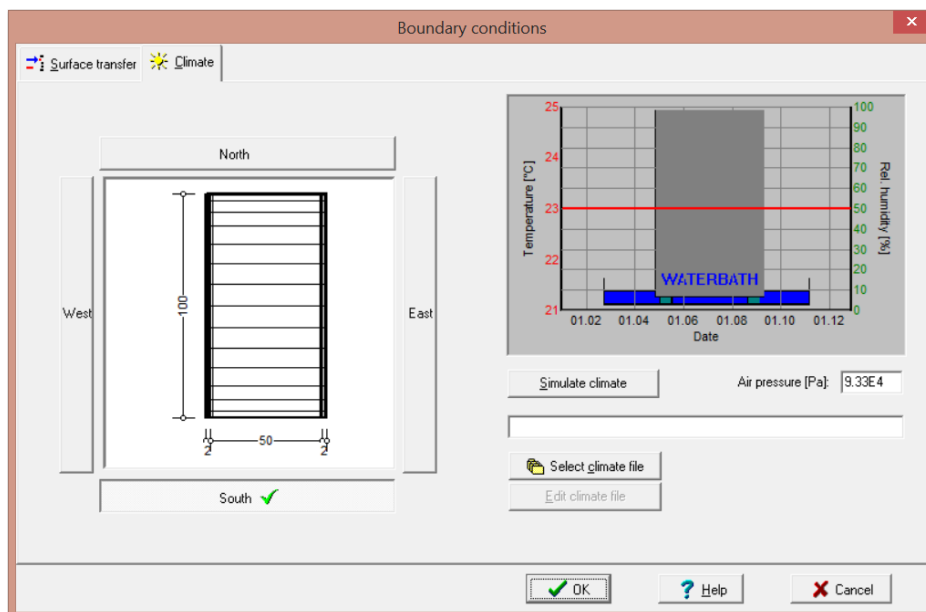


Figura 3.9. – Clima da base.

É de referir também que é possível importar um ficheiro climático através da opção “Select climate file”. Usa-se esta opção quando se pretende simular as características climáticas reais de um clima exterior.

#### 3.4.4. PARAMETERS

Os parâmetros incluídos neste submenu referem-se essencialmente às condições iniciais da simulação, ponto de partida das condições ambientais, aos intervalos e datas de início e fim da simulação. Inclui também a localização onde o ficheiro de resultados irá ser guardado.

##### 3.4.4.1. Initial conditions

As condições iniciais, apresentadas na figura 3.10. e 3.11. são as condições de temperatura e humidade relativa existentes no início da simulação. Como este projeto procura ser fiel aos ensaios laboratoriais anteriormente realizados, o ambiente é constante durante toda a simulação/ensaio e, portanto, a temperatura é fixada novamente em 23°C e a humidade relativa em 53%.

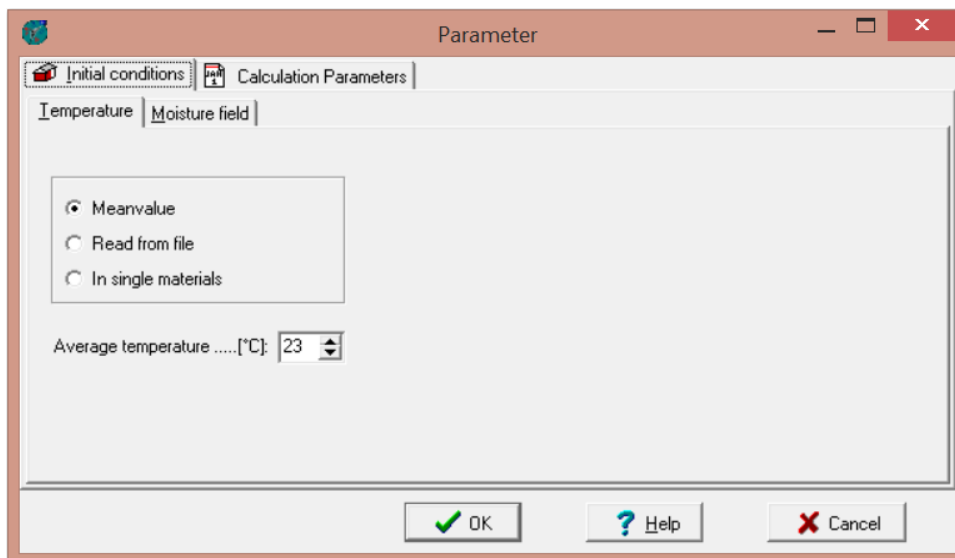


Figura 3.10. – Condições iniciais de temperatura.

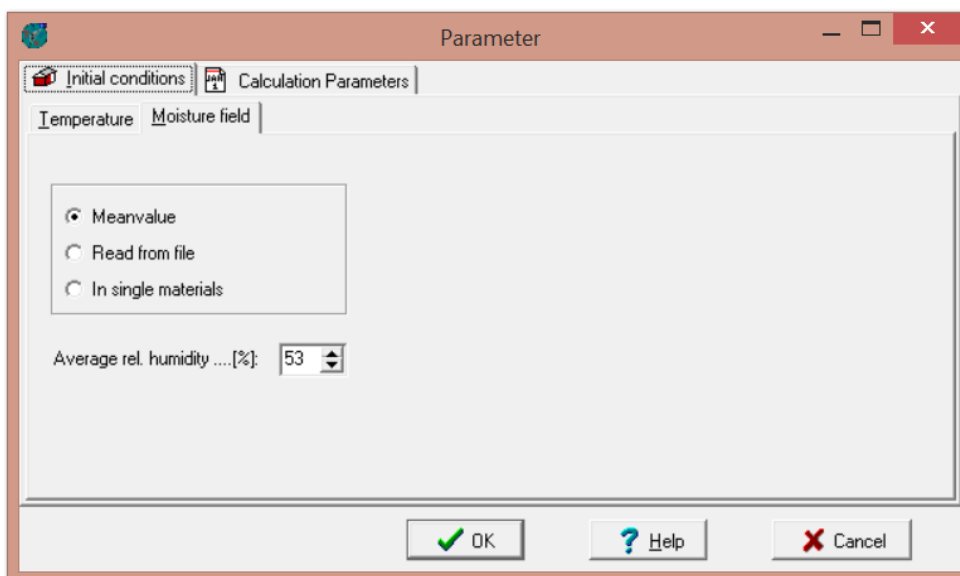




Figura 3.11. – Condições iniciais de humidade relativa.

Neste campo opcional encontram-se três formas de definir condições iniciais:

- 1) Mean value: aplica um valor médio à temperatura e humidade relativa, como neste projeto;
- 2) Read from file: permite importar um ficheiro;
- 3) In single materials: alteram-se as condições iniciais de um ou vários materiais que constituem o elemento construtivo e que foram escolhidos pelo utilizador.

De salientar que estes dois parâmetros apresentam as mesmas formas de criação de condições base, mas estas são independentes entre si, ou seja, pode ser definido um valor médio para a temperatura e ser alterada apenas a humidade relativa de um material, por exemplo.

#### 3.4.4.2. Calculation Parameters

Como apresentado na figura 3.12. são aqui escolhidas as datas de início e fim do cálculo assim como o ‘time step’ que se refere ao intervalo de tempo que o programa considera como tempo de simulação. Neste projeto define-se um intervalo de tempo de uma hora que significa que os vários parâmetros do ficheiro de resultados serão lidos de hora a hora e num espaço temporal a definir, neste caso, um ano. Em “File of result” define-se o local onde o ficheiro vai ser guardado no final da simulação.

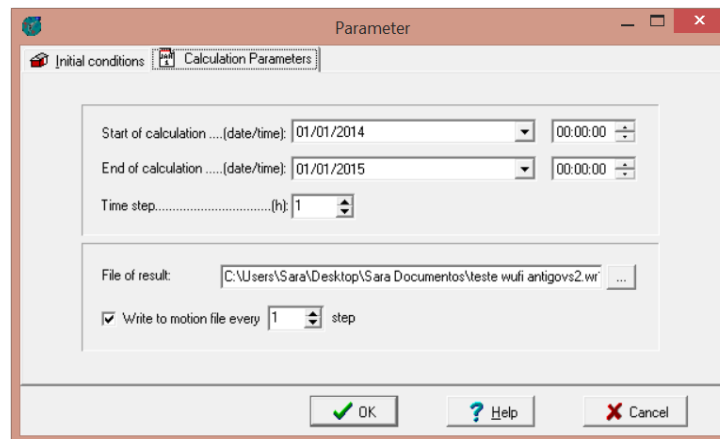


Figura 3.12. – Parâmetros de cálculo

#### 3.4.5. NUMERIC

Em numeric são apresentados os parâmetros relativos ao ficheiro final de resultados como se mostra na figura 3.13.

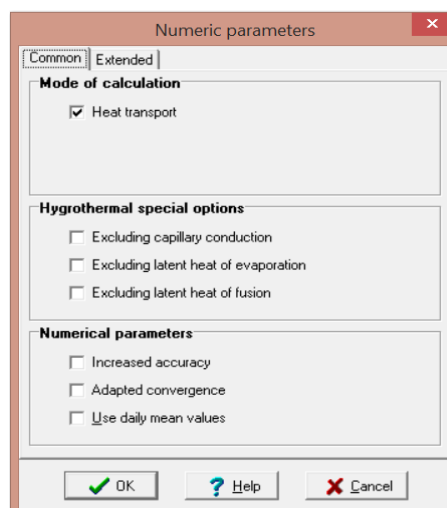


Figura 3.13. – Parâmetros numéricos

Escolhem-se quais os parâmetros a ser avaliados e define-se o tipo transporte de calor.

A opção ‘extended’ é mais direcionada para utilizadores experientes que pretendem realizar simulações com resultados e avaliações mais específicos.

### 3.5. CALCULATION

É este menu que inicia a simulação, sendo composto por três submenus referentes ao desenvolvimento da simulação.

- Run: inicia a simulação;
- Pause: pausa a simulação;
- Abort: termina a simulação.

### 3.6. OUTPUT

Os resultados aparecerão disponíveis dentro deste menu. Neste projeto uma opção interessante é o “Movie”, um filme da simulação que contém os gráficos de temperatura, humidade relativa e teor de humidade (figura 3.14.). O WUFI permite analisar cada gráfico e o seu respetivo filme individualmente bastando para isso clicar sobre o gráfico que se pretende. Surgirão menus nessa mesma janela que permitem correr o filme, pará-lo, reiniciá-lo e ver as características da simulação efetuada.

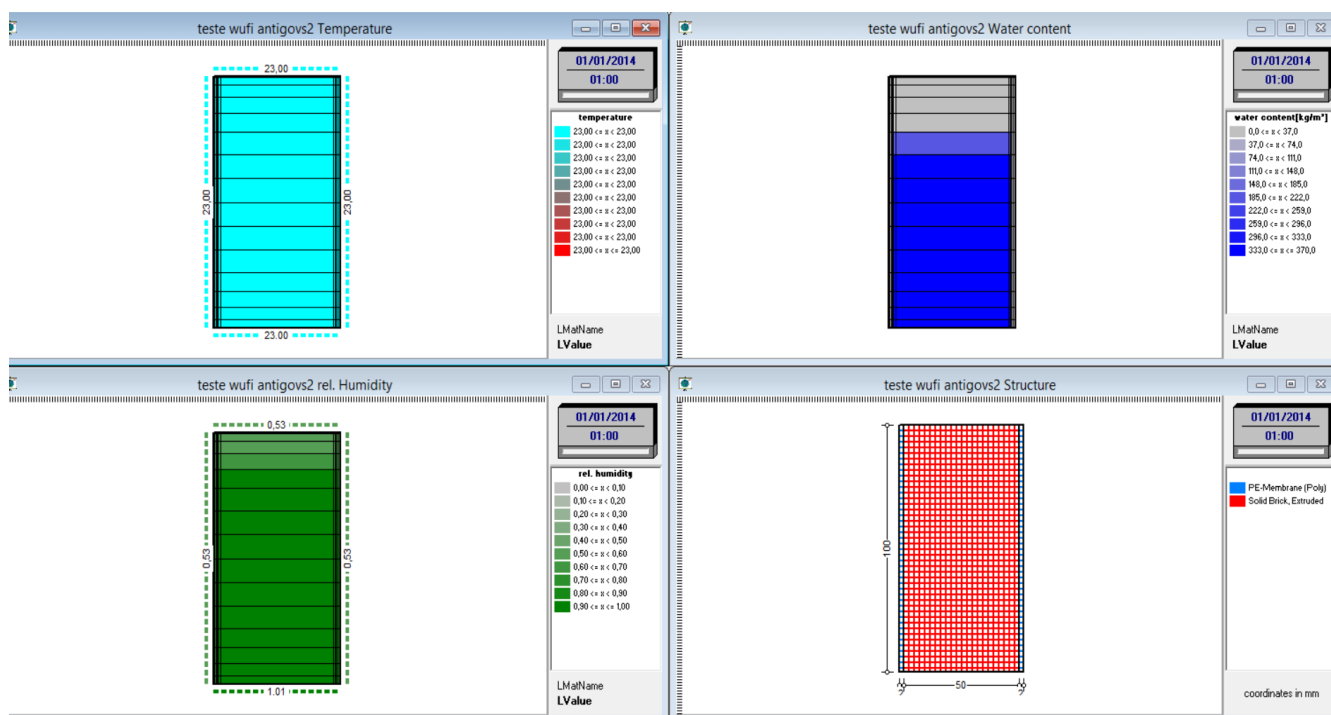


Figura 3.14. – Gráficos de resultados.

Relativamente à escala esta pode ter as suas cores alteradas. Clicando sobre um intervalo é possível escolher uma panóplia de cores e, ainda, definir os valores máximos e mínimos desse mesmo intervalo. É importante ressaltar que o software não guarda essas informações pelo que as definições virão as

existentes por default sendo necessário proceder de novo a todas as alterações na escala, quer ao nível das cores quer ao nível dos valores dos intervalos, sempre que se reinicia a simulação.

No output são apresentados os valores ao longo da simulação sendo possível exportar para um ficheiro toda a informação temporal, instantânea ou mesmo local através dos perfis hídricos.

### 3.7. PERFIS HÍDRICOS

Os perfis hídricos permitem a análise local da simulação. Podem ser retirados para qualquer momento temporal e podem ser transversais ou longitudinais. A análise dos perfis hídricos permite perceber a forma como a água se distribui pelo elemento simulado.

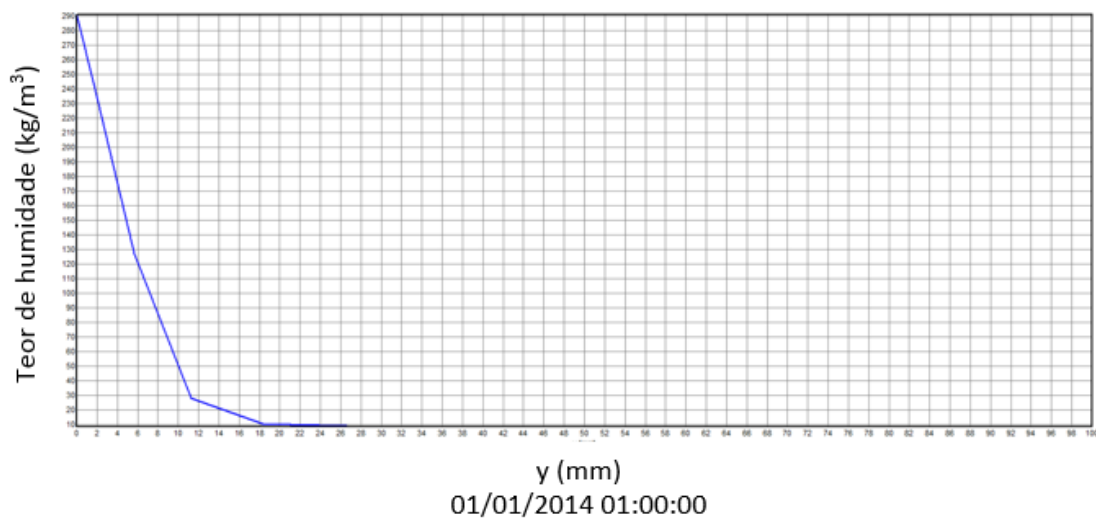


Figura 3.15. – Perfil hídrico longitudinal (1h).

Na figura 3.15., que representa um perfil hídrico longitudinal ao fim de uma hora de simulação correspondente ao meio do provete ( $x=27\text{mm}$ ), observa-se que para  $y=0$ , ordenada da base do elemento, o teor de humidade é máximo. No entanto, também é observável que por se tratar da fase inicial de embebição, o perfil decresce rapidamente até um teor de humidade nulo que se mantém de uma altura aproximada de 30mm até à face superior do elemento,  $y=100\text{mm}$ .

Para comparação apresenta-se na figura 3.16. o perfil hídrico longitudinal ao fim de um dia de simulação.

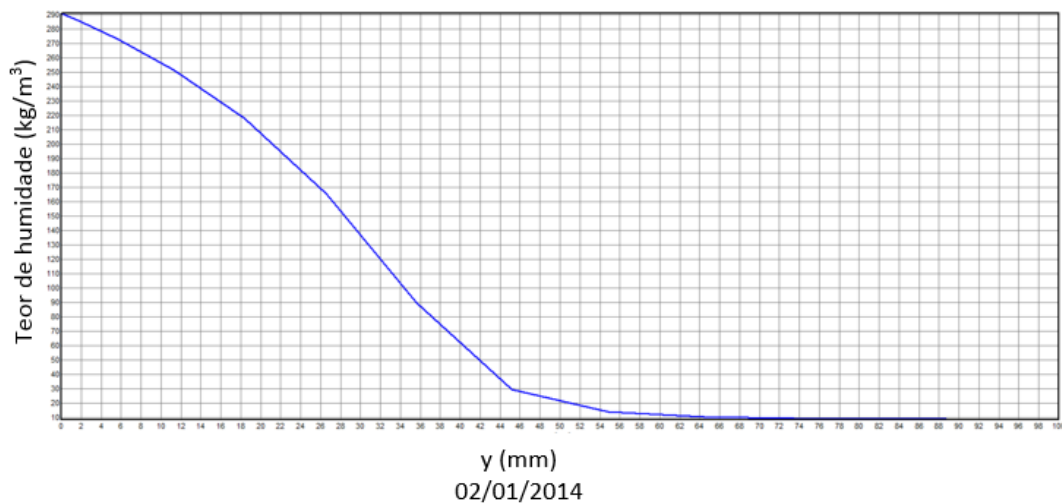


Figura 3.16. – Perfil hídrico longitudinal (1dia).

Observa-se a progressão da água ao longo do elemento quando comparámos os dois perfis. No segundo, correspondente a um dia de simulação, o teor de humidade é elevado na maior parte do provete e decresce até zero já muito perto do limite superior, o que traduz a absorção de água do provete ao longo do tempo.

Na figura 3.17. apresenta-se o perfil hídrico transversal, para  $y=50$ mm, ao fim de uma hora de simulação.

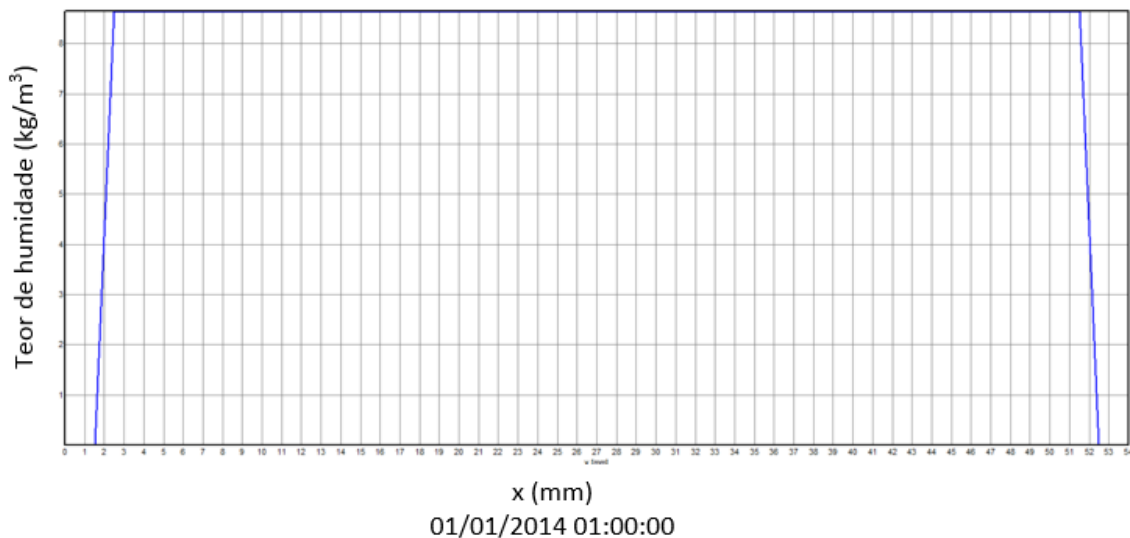


Figura 3.17. – Perfil hídrico transversal (1h).

A análise gráfica mostra que, nesta fase, a água ainda não atingiu o meio do elemento e, por isso, verifica-se o teor de humidade residual nas camadas de membrana impermeabilizante nas faces laterais e o teor de humidade intrínseco do material na zona central do perfil.

Ao fim de um dia de simulação, para a mesma altura, obtém-se o perfil hídrico presente na figura 3.18.

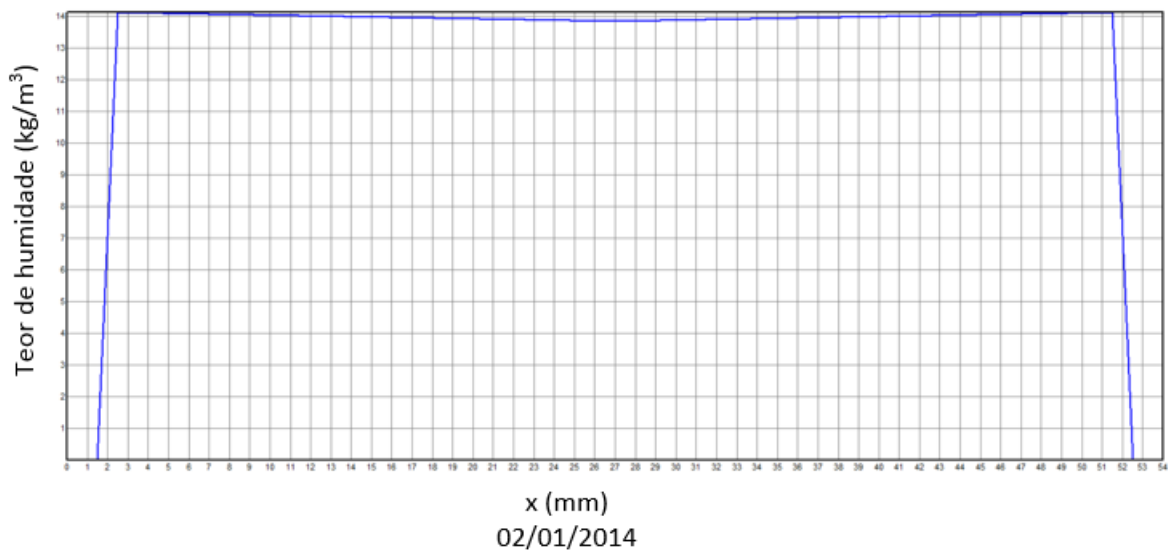


Figura 3.18. – Perfil hídrico transversal (1 dia).

É interessante verificar que o aumento do teor de humidade se dá das faces laterais para o centro, isto é, junto aos limites das membranas o teor de humidade é superior ao registado no centro do elemento. A absorção de água processa-se das faces laterais para o interior dos elementos simulados.

### 3.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo fez-se uma apresentação do programa de cálculo WUFI 2D. Percorreram-se todos os menus e apresentaram-se as funcionalidades e objetivos de cada um.

Em síntese:

- O WUFI 2D é um modelo de simulações numéricas para estudo higrotérmico;
- Permite a definição de elementos geométricos de dimensões, materiais e composição variáveis;
- Apresenta as características intrínsecas dos materiais presentes na base de dados;
- Analisa as várias formas de condução de calor e transporte de humidade;
- Permite a criação de ambientes climáticos interiores e exteriores;
- Analisa os dados introduzidos durante o período de tempo definido pelo utilizador e permite escolher o intervalo entre medições;
- Os resultados são apresentados em três gráficos: humidade relativa, teor de humidade e temperatura;
- Para cada gráfico é criado um filme que apresenta a progressão da variável selecionada, durante o período de tempo definido para a simulação;
- Em cada gráfico é possível a apresentação dos dados através de perfis hídricos transversais e longitudinais, para cada intervalo de tempo.

O interesse da utilização do WUFI 2D prende-se com a sua ampla utilização no domínio dos estudos higrotérmicos. A análise da interface através das simulações numéricas permite aferir a utilidade deste modelo de simulação numérica no estudo desse fenómeno.

A apresentação dos resultados através de perfis hídricos permite observar a progressão da absorção de água ao longo do tempo e a forma como o transporte de humidade se efetua ao longo do elemento e interface simulada.



# 4.

## **SIMULAÇÃO DINÂMICA DO FENÓMENO DA CAPILARIDADE. ANÁLISE DA INTERFACE**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

No presente capítulo pretende-se, com recurso ao já descrito programa de simulação WUFI 2D analisar fenómenos de embebição em elementos multicamada avaliando os resultados dos ensaios laboratoriais, tendo em vista a comparação de resultados entre ambos, nomeadamente a análise do transporte de humidade nas zonas de interface.

Nas simulações realizadas foram definidas as condições ambientais laboratoriais e o material seleccionado de modo a que o transporte de água se assemelhasse ao do material ensaiado em laboratório, tijolo/barro vermelho. A transferência de humidade unidirecional foi garantida através da aplicação de uma membrana impermeabilizante nas faces laterais dos vários elementos simulados.

É esperado que os resultados das simulações variem com o tipo de interface. Embora haja diversos estudos sobre a interface não há muitos que simulem numericamente o transporte de humidade em elementos multicamadas o que justifica, por um lado, a difícil previsão de resultados e, por outro, a importância destes.

O recurso ao programa muito utilizado no Laboratório de Física das Construções (LFC) procura avaliar a consistência dos resultados por comparação com trabalhos laboratoriais e assim analisar a adequabilidade do programa em termos de eficácia, eficiência e possíveis limitações na simulação de elementos com interfaces, uma vez que se trata de um programa correntemente usado em estudos higrétricos.

Interessante, também, é verificar como é que as várias interfaces influenciam o transporte de humidade nas simulações numéricas e se os resultados se aproximam dos obtidos experimentalmente bem como noutros estudos referenciados.

Com base nos ensaios laboratoriais utilizou-se o provete monolítico como referência e ainda três tipos de interface: provete em contacto hidráulico, provete com espaço de ar e provete em contacto perfeito. Os elementos foram impermeabilizados nas faces laterais, sujeitos a condições de humidade e temperatura medidas em laboratório e a sua base colocada em contacto com água líquida.

### **4.2. ENSAIOS LABORATORIAIS**

#### **4.2.1. ENSAIOS**

Os ensaios laboratoriais foram efetuados utilizando quatro tipos de amostras: uma amostra de referência, provete monolítico, e três provetes com interfaces, provete em contacto perfeito, provete com espaço de ar e provete em contacto hidráulico. Para cada situação foram ensaiados três provetes, num total de 12 ensaios. Todos os provetes foram impermeabilizados para garantir um fluxo capilar unidirecional.

Os tipos de provetes ensaiados encontram-se esquematizados na figura 4.1, onde se procurou definir sempre as mesmas dimensões, 50\*50\*100mm, sendo que no provete contacto hidráulico a argamassa tem 7mm de espessura e no provete com espaço de ar a interface está definida com 3mm de espessura.

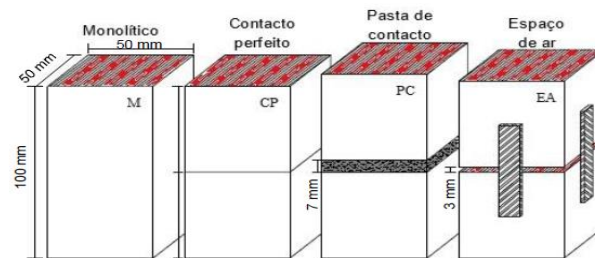


Figura 4.1. – Esquema dos provetes ensaiados [2].

#### 4.2.2. RESULTADOS

Durante os ensaios foram efetuadas pesagens da massa de cada provete. Como os provetes foram secos em estufa considera-se que o aumento de massa se deve unicamente ao aumento de água absorvida até essa altura, pelo que a diferença entre a massa medida e a massa inicial do provete seco corresponde à água absorvida.

Estas medições permitiram efetuar uma análise de resultados segundo duas vertentes:

- A análise do acréscimo de massa em função do tempo, que permite o cálculo do FLUMAX transmitido nos casos dos provetes com interfaces, que corresponde ao declive da curva de absorção após ter sido atingida a interface, ou seja, corresponde ao segundo troço da curva;
- A análise do acréscimo de massa em função da raiz do tempo que permite calcular o coeficiente de capilaridade que corresponde ao declive do troço linear da curva de absorção, ou seja, o primeiro troço da referida relação.

As figuras 4.2. a 4.5 apresentam os gráficos das curvas de absorção dos quatro tipos de amostras ensaiadas (valores médios), a partir dos quais foram calculados os valores do coeficiente de capilaridade para cada uma delas. Estes coeficientes correspondem ao declive da reta de regressão aplicada ao primeiro troço (a laranja).

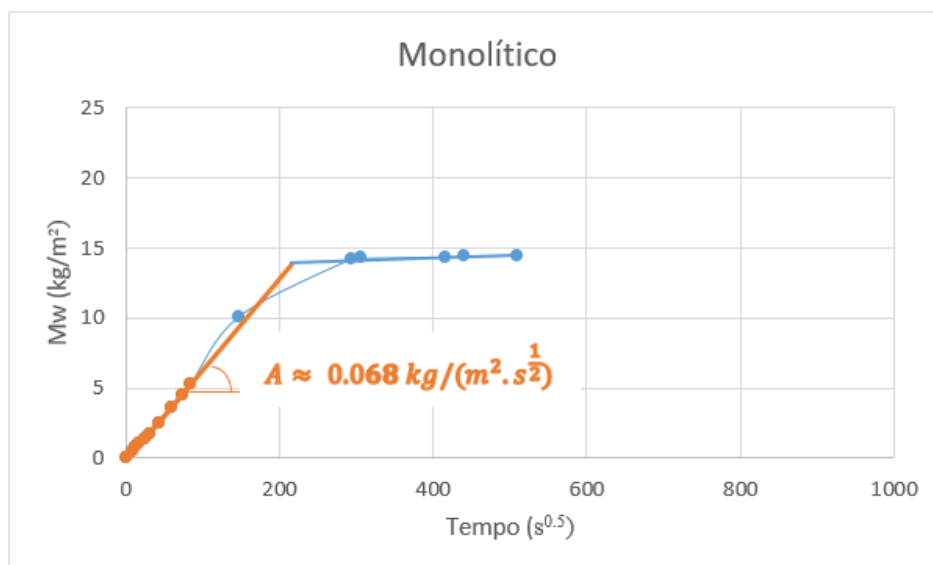


Figura 4.2. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos.



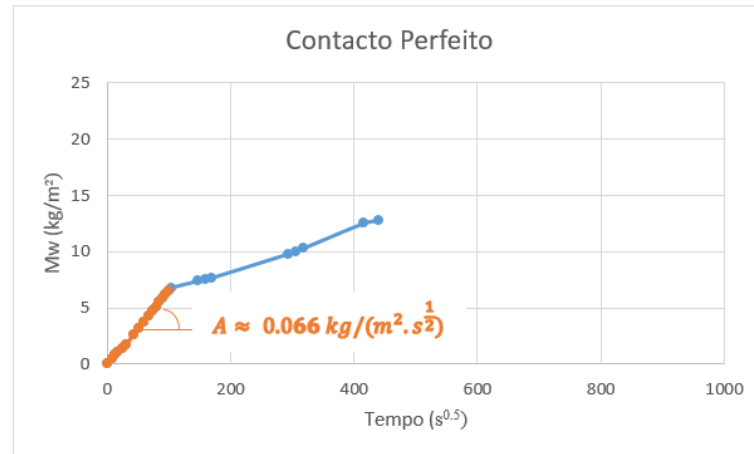


Figura 4.3. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes em contacto perfeito.

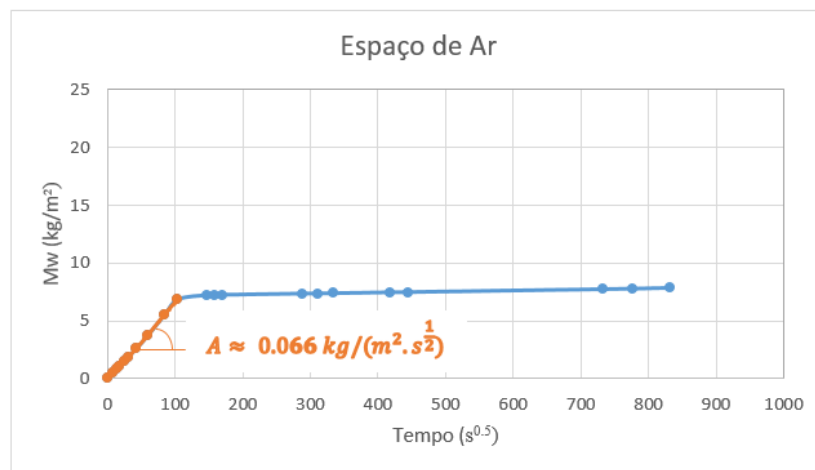


Figura 4.4. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes com espaço de ar.

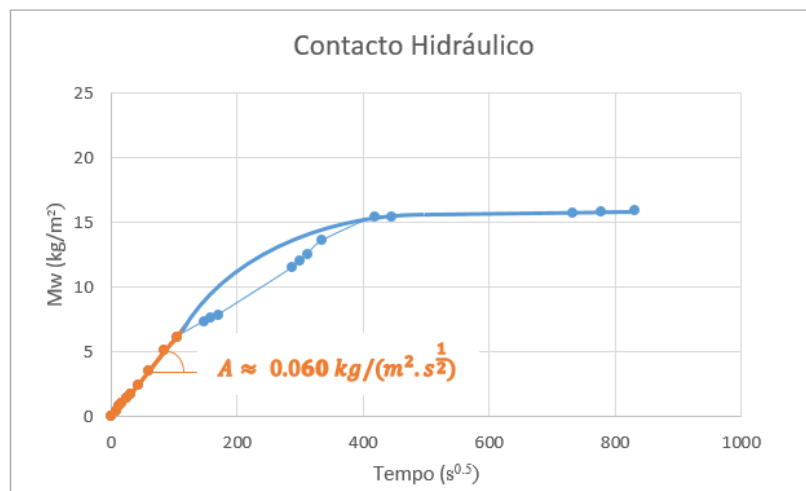


Figura 4.5. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes em contacto hidráulico.

A tabela 4.1. resume os valores médios do coeficiente de capilaridade obtidos com base nos resultados dos ensaios realizados.

Tabela 4.1. – Coeficientes de capilaridade dos ensaios.

Coeficiente de Capilaridade (kg/ (m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ))			
Monolítico	Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
≈ 0,068	≈ 0,066	≈ 0,066	≈ 0,060

Relativamente ao fluxo máximo transmitido, FLUMAX, foi calculado através da reta de regressão do segundo troço das curvas de absorção da massa em função do tempo, representadas nas figuras 4.6. a 4.8.

Este fluxo máximo só faz sentido calcular no caso de existir interfaces, uma vez que o segundo troço representa a curva de absorção após a água ter atingido a interface.

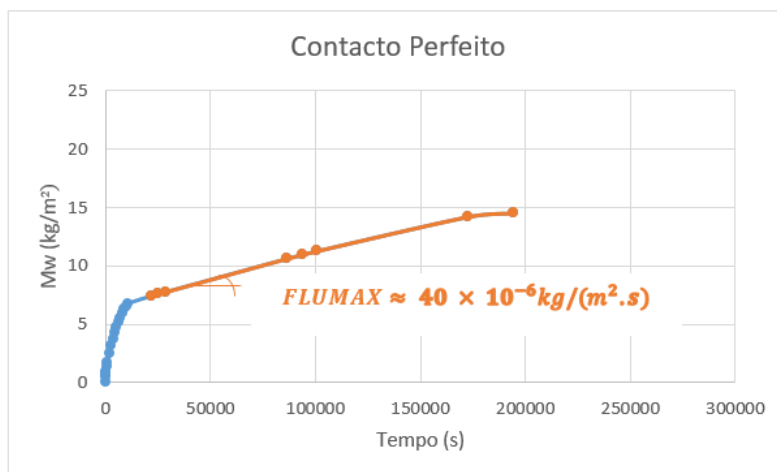


Figura 4.6. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, dos provetes em contacto perfeito.

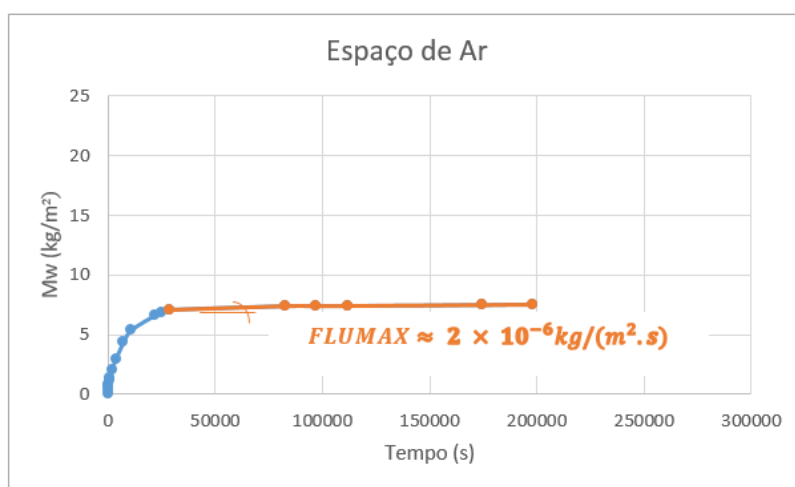


Figura 4.7. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar.

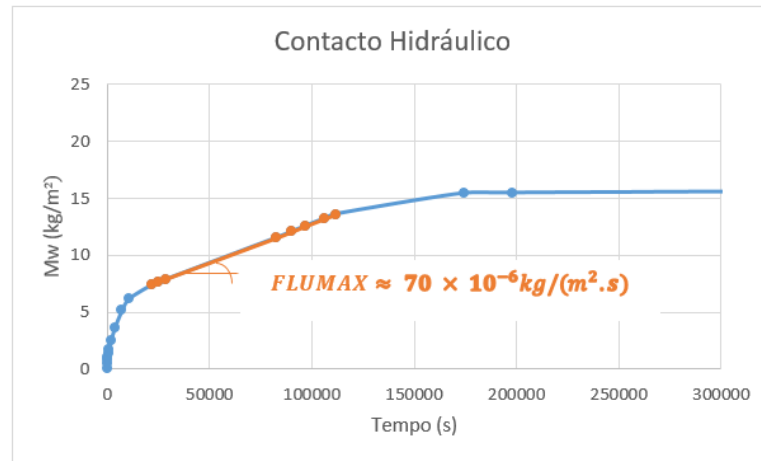


Figura 4.8. – Curva média de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, dos provetes em contacto hidráulico.

A tabela 4.2. resume os valores médios finais do FLUMAX para as diferentes interfaces analisadas e materiais estudados.

Tabela 4.2. – Valores de FLUMAX dos ensaios laboratoriais.

FLUMAX ( $\text{kg/(m}^2.s)$ )		
Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
$\approx 40 \times 10^{-6}$	$\approx 2 \times 10^{-6}$	$\approx 70 \times 10^{-6}$

### 4.3. SIMULAÇÕES EFETUADAS

#### 4.3.1. OS PROJETOS DEFINIDOS

No WUFI 2D foram criados quatro projetos correspondentes às quatro amostras tipo ensaiadas em laboratório.

O esquema de simulação, retirado do WUFI, de cada uma das amostras encontra-se nas figuras 4.9. e 4.10.

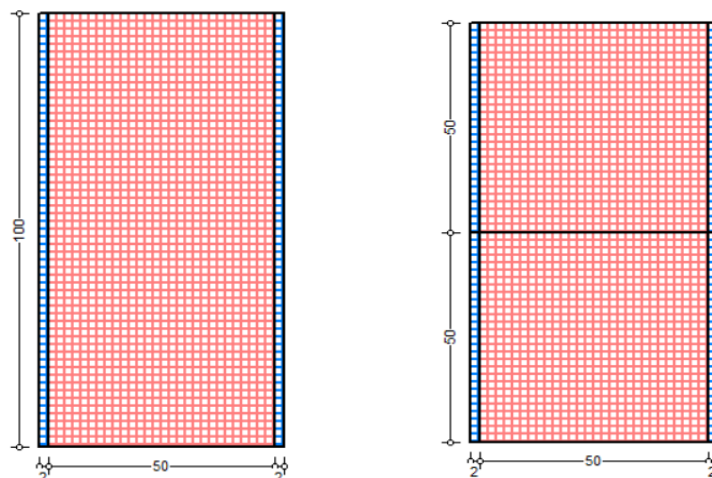


Figura 4.9. – Esquema do provete monolítico à esquerda; provete em contacto perfeito à direita

- Projeto Monolítico: provete com dimensões 50\*100mm e membrana impermeabilizante de 2\*100mm nas faces laterais, comum às restantes amostras;
- Projeto Contacto Perfeito: dois provetes justapostos de dimensões 50\*50mm, medida que vai permanecer nas restantes amostras com interfaces;
- Projeto Espaço de Ar e Contacto Hidráulico: dois provetes separados por um espaço de ar de 3mm, no primeiro caso e por 7mm de argamassa, com propriedades próximas da argamassa utilizada nos ensaios laboratoriais, no segundo.

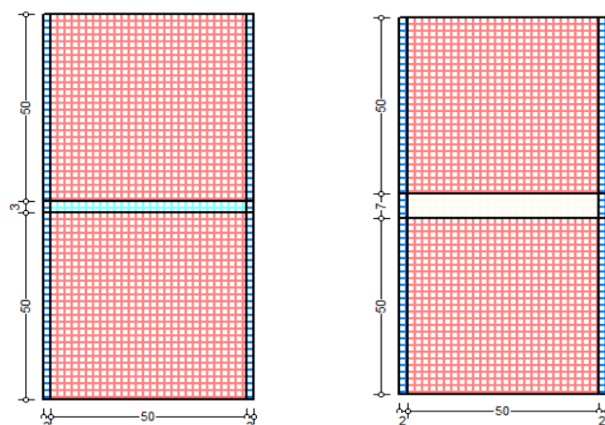


Figura 4.10. – Esquema dos provetes: à esquerda espaço de ar, à direita em contacto hidráulico.

As condições ambientais foram definidas com os valores médios de temperatura e humidade relativa presentes na tabela 4.3., correspondentes aos valores medidos nos ensaios laboratoriais.

Tabela 4.3. – Condições ambientais do laboratório [2].

	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)
Valor médio	22,84	52,67
Valor máximo	23,79	60,44
Valor mínimo	21,06	44,17
Desvio padrão	0,695	2,513
Coefficiente de variação	3,04 %	4,77 %

A partir destes valores de referência foram criados dois climas, apresentados na figura 4.11.: nas faces laterais e face superior as condições laboratoriais e na base água líquida.

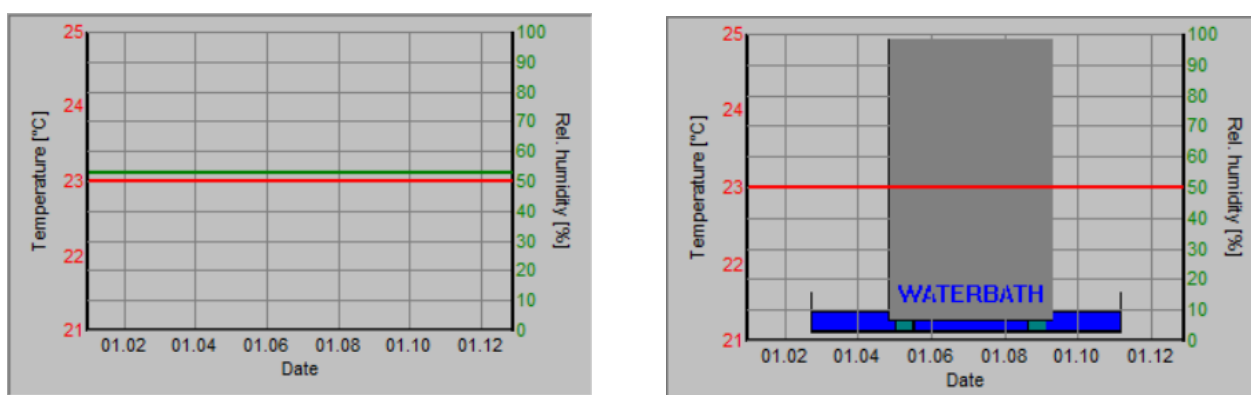


Figura 4.11. – Climas das faces laterais e superior à esquerda; clima da base à direita.

O primeiro corresponde a um clima de temperatura e humidade constantes com valores de 23°C e 53%, respetivamente. O segundo clima, o da base, corresponde a uma temperatura de 23°C e a uma humidade relativa de “101%”, que permite, no WUFI 2D, garantir que o programa assume a existência de água líquida na base e assim efetuar-se as simulações numéricas de absorção de água por capilaridade.

No que diz respeito ao material, foi escolhido aquele cuja progressão inicial se aproximava mais da registada nos ensaios laboratoriais. Através da base de dados fornecida pelo WUFI 2D, foram experimentados os vários materiais e retirados os seus perfis hídricos para as primeiras quatro horas de ensaios. De seguida foi calculado o acréscimo de água presente na simulação e comparado com o acréscimo de água registado nas amostras laboratoriais. O material com correspondência nestes quatro pontos foi o escolhido para as simulações. De referir que este método foi aplicado à simulação monolítica por esta ser a amostra de referência.

#### 4.3.2. CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS

A maior dificuldade foi, de facto, criar uma correlação entre os valores dos ensaios laboratoriais e os resultados do WUFI 2D que permitisse uma análise comparativa sobre o transporte de água por capilaridade. Analisando estes dois resultados destacam-se algumas diferenças importantes:

- 1) O WUFI 2D não considera um volume pelo que os provetes sendo bidimensionais (2D), apresentam a unidade de área  $m^2$  enquanto nos ensaios é considerado todo o sólido e os resultados são obtidos por  $m^3$ ;
- 2) O WUFI 2D mede o teor de humidade para cada intervalo de tempo, enquanto nos ensaios laboratoriais é medida a massa;
- 3) O WUFI 2D produz uma simulação para cada projeto, enquanto nos ensaios repetiu-se três vezes cada ensaio.

Para ser possível a análise comparativa dos resultados numéricos e experimentais, o método escolhido apresenta as etapas seguintes:

- ✓ Assumir que o aumento da massa no laboratório se deve unicamente ao aumento do teor de água do provete nos ensaios.

É de extrema importância referir que se considera o aumento da massa do provete como resultado direto da absorção de água líquida, ou seja, a diferença de gramas entre a massa do provete seco e a massa em cada pesagem é originada apenas pelo aumento de água no provete e por isso corresponde diretamente à quantidade de água presente em cada amostra. Uma vez que os provetes foram secos em estufa antes do início do ensaio considera-se que o seu teor de água é nulo ou muito reduzido. Após a imersão em água líquida ocorre uma variação da massa dos provetes que, dado que não há variação em nenhuma das condições associadas, se assume como a massa da água absorvida pela amostra.

- ✓ Uniformizar os três ensaios de cada amostra.

Para cada amostra laboratorial são ensaiados três provetes o que dá origem a três resultados. O WUFI 2D efetua apenas uma simulação à qual corresponde um conjunto de resultados. Assim, foi necessário uniformizar os resultados dos ensaios laboratoriais. Como se mostra na tabela 4.4., é calculada a média dos três resultados laboratoriais para que exista apenas um resultado que possa ser comparável ao resultado da simulação numérica correspondente.

Tabela 4.4. – Uniformização dos resultados dos ensaios laboratoriais no provete monolítico.

M1,1	M1,2	M1,3	média	Δmassa (gramas)
595,98	576,82	578,27	583,69	0,00
597,23	578,25	579,57	585,02	1,33
597,99	579,21	580,39	585,86	2,18
598,61	579,80	581,00	586,47	2,78
599,60	580,94	582,09	587,54	3,86
600,34	581,90	582,96	588,40	4,71
602,21	583,98	584,99	590,39	6,71
605,07	587,08	588,06	593,40	9,71
607,40	589,58	590,50	595,83	12,14
609,44	591,74	592,65	597,94	14,26
611,31	593,70	594,59	599,87	16,18
613,05	598,71	599,62	603,79	20,11
617,58	600,19	601,91	606,56	22,87
618,95	601,60	603,91	608,15	24,46

A utilização de três ensaios por amostra tem como objetivo acautelar possíveis resultados desviantes que influenciem negativamente o cálculo do coeficiente de capilaridade e do FLUMAX. Nem todas as amostras utilizam os resultados dos três ensaios e, por isso, para cada provete foram utilizados na média os ensaios cujos valores foram considerados representativos e excluídos os provetes cujos resultados não correspondiam ao comportamento esperado.

- ✓ Relacionar o aumento do teor de humidade com o aumento da massa de água.

Este é o ponto fundamental para o sucesso de toda a análise. Após a uniformização dos ensaios foi necessário relacionar a informação contida nos perfis hídricos resultantes do WUFI 2D, que se referem ao teor de humidade, com o aumento da massa registado em laboratório.

Os perfis hídricos mencionados são retirados do filme do gráfico do teor de humidade que o programa WUFI 2D produz. Podem ser retirados para qualquer intervalo temporal, gerando-se automaticamente o perfil hídrico correspondente, como já referido no capítulo 2.

A correlação dos dados escolhida foi também, utilizada em 1992 por Vasco Freitas [5], que consiste no “método das fatias”, isto é, o tratamento dos dados por divisão dos provetes em fatias, representado na figura 4.12. que correspondem à integração dos perfis hídricos por aproximação de retângulos como se esquematiza na figura 4.13.

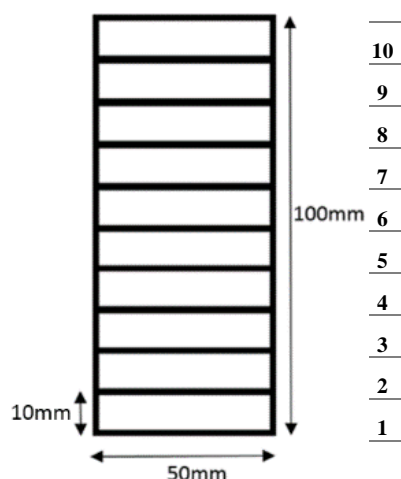


Figura 4.12. – Esquema do método das fatias no provete.

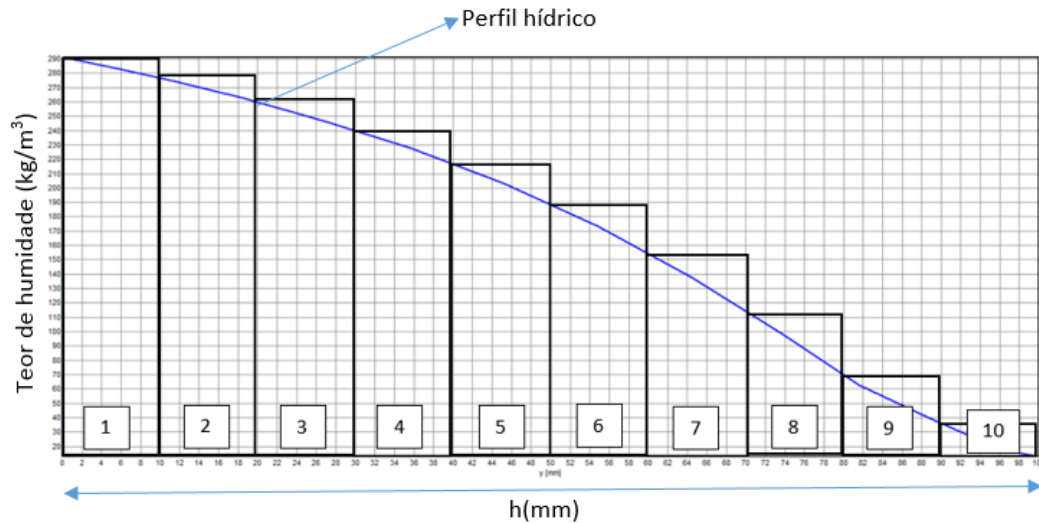


Figura 4.13. – Esquema do método das fatias no perfil hídrico.

Como Vasco Freitas constatou na sua tese de doutoramento[5], para serem obtidos valores exatos, a área do perfil hídrico deveria ser calculada pelo integral da curva gráfica, mas a diferença entre o valor exato e o valor do cálculo por aproximação de retângulos não é significativa, logo será utilizado este último processo de cálculo já que é o mais simples.

Para cada medição, por exemplo ao fim de 1h, retira-se o valor do teor de humidade de cada altura  $h$ , o que origina dez valores. O somatório deste valor representa o teor de humidade absorvido pelo provete durante uma hora de ensaio expresso em  $\text{kg/m}^3$ .

Este valor vai agora ser multiplicado pela largura dos provetes em laboratório, 0.05m, para que a unidade seja  $\text{kg/m}^2$ , tal como nos ensaios.

Em resumo, este valor final representa a variação da massa, em  $\text{kg/m}^2$ , ao fim do instante para o qual é obtido o perfil hídrico. Por exemplo, para um perfil hídrico retirado ao fim de uma hora, este valor traduz a massa de água que o provete absorveu durante uma hora de ensaio.

Nas simulações foram retirados os perfis hídricos correspondentes às horas em que foram efetuadas medições nos ensaios laboratoriais, de forma a haver correspondência nos intervalos de medição.

#### 4.3.3. RESULTADOS

O cálculo do coeficiente de capilaridade foi efetuado através do declive da curva de regressão dos primeiros troços da curva de absorção calculada a partir dos perfis hídricos retirados do WUFI 2D, após a aplicação do método das fatias a esses perfis. As curvas de absorção de cada uma das simulações numéricas estão representadas nas figuras 4.14. a 4.17.

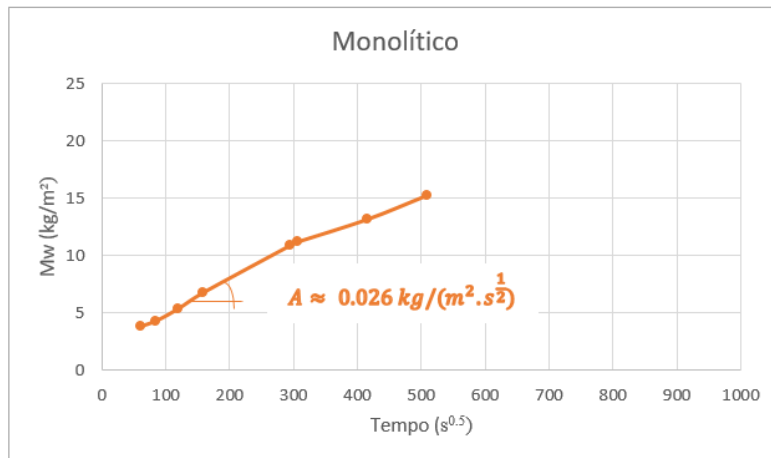


Figura 4.14. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete monolítico.

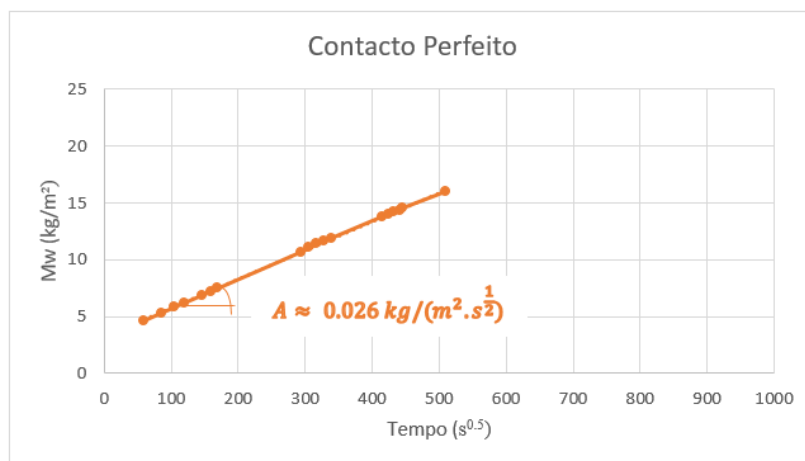


Figura 4.15. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete em contacto perfeito.

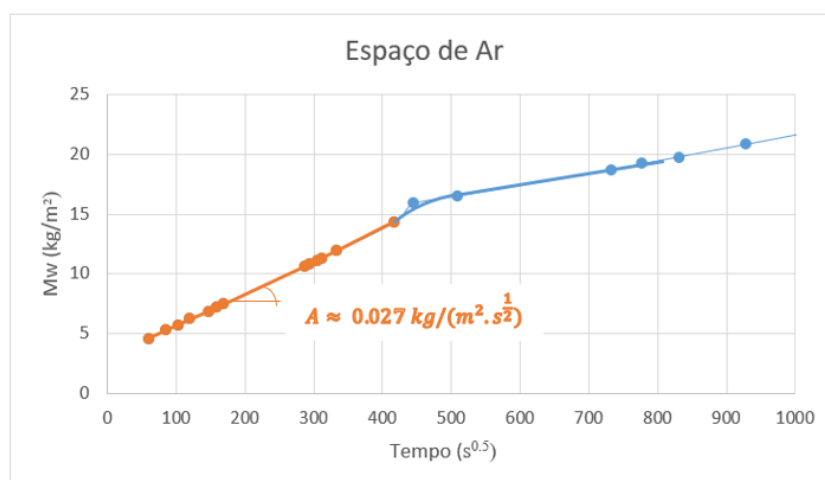


Figura 4.16. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete com espaço de ar.



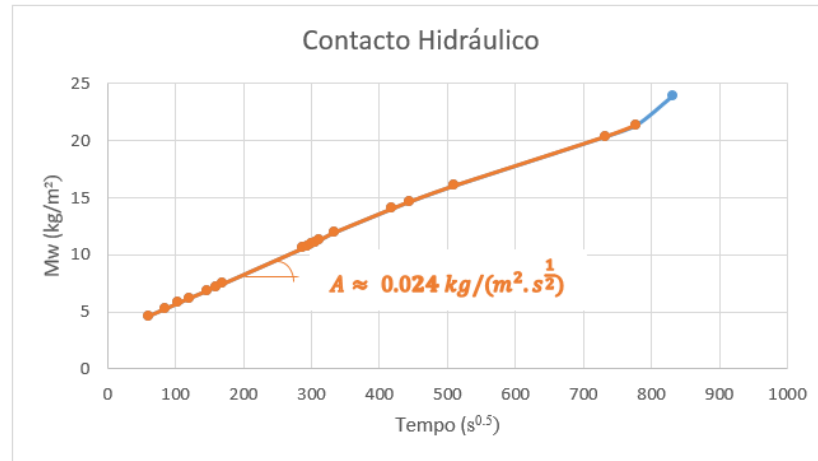


Figura 4.17. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete em contacto hidráulico.

A tabela 4.6. resume os valores para o coeficiente de capilaridade. Como esperado, os valores são semelhantes entre si porque a água ainda não atingiu a interface.

Tabela 4.6. – Coeficientes de capilaridade das simulações.

Coeficiente de Capilaridade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ )			
Monolítico	Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
$\approx 0,026$	$\approx 0,026$	$\approx 0,027$	$\approx 0,024$

O FLUMAX corresponde ao declive do segundo troço da curva que traduz a absorção de água a partir do momento em que esta atinge a interface, pelo que só é calculado para os provetes com interface. As figuras 4.18. a 4.20. apresentam as curvas de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, dos provetes simulados. Por questões de visualização as curvas dos provetes com espaço de ar e em contacto perfeito têm escalas horizontais diferentes da curva dos provetes em contacto perfeito.

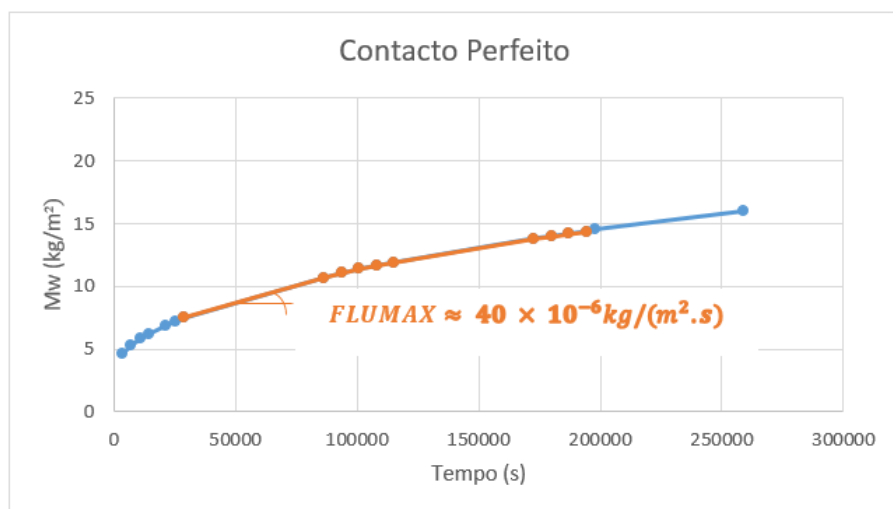


Figura 4.18. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, do provete em contacto perfeito.

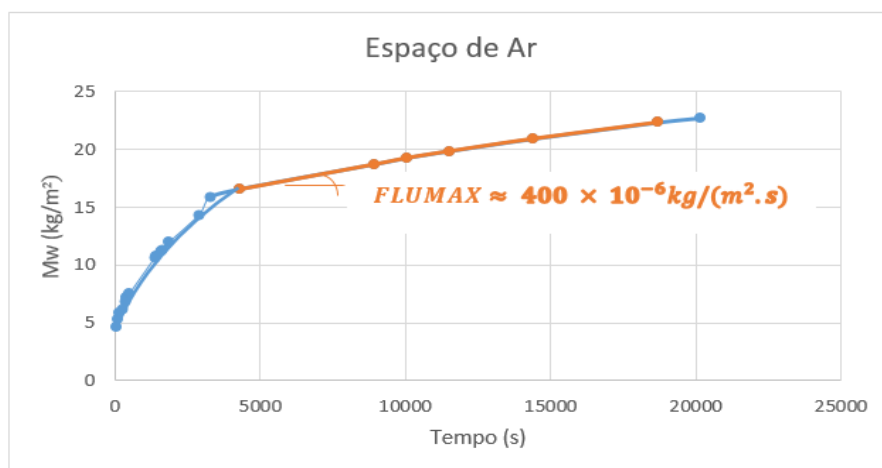


Figura 4.19. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, do provete com espaço de ar.

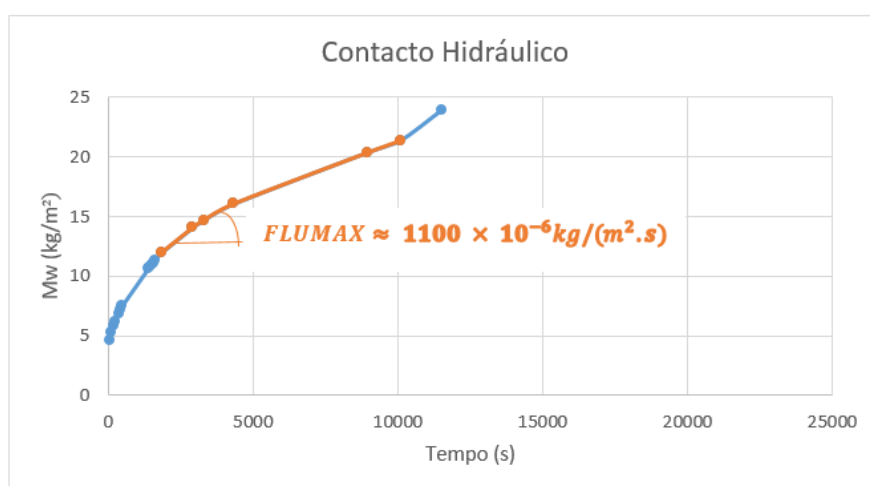


Figura 4.20. – Curva de absorção de água por capilaridade, em função do tempo, do provete em contacto hidráulico.

A tabela 4.7. resume os valores de FLUMAX resultado das simulações.

Tabela 4.7. – Valores de FLUMAX das simulações numéricas.

FLUMAX (kg/ (m².s))		
Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
$40 \times 10^{-6}$	$400 \times 10^{-6}$	$1100 \times 10^{-6}$

A análise da tabela permite verificar que a interface contacto perfeito apresenta um valor de FLUMAX semelhante ao esperado. Dado que este valor não se traduz numa resistência hídrica na curva de absorção, pode afirmar-se que este valor pode ser uma coincidência. Nos outros dois casos, os valores são bastante superiores ao esperado.

A consideração, por parte do WUFI 2D, de uma estrutura contínua, no caso da interface contacto hidráulico, e a consideração da porosidade da argamassa após a água atingir a interface, faz com que o

valor do fluxo seja bastante superior e, consequentemente, a absorção de água se faça de forma mais rápida.

Na interface espaço de ar não há corte hídrico, originado pelo transporte de água em fase de vapor, porque o WUFI 2D continua a considerar a passagem de água líquida entre camadas, daí o valor do fluxo elevado.

Com o intuito de caracterizar a cinética da embebição no interior de cada interface, foram retirados pontos médios ao nível da faixa da interface em cada uma das simulações. Com esses pontos foram criadas as curvas de absorção por capilaridade representadas na figura 4.21. que relacionam o teor de humidade das interfaces, em função da raiz do tempo.

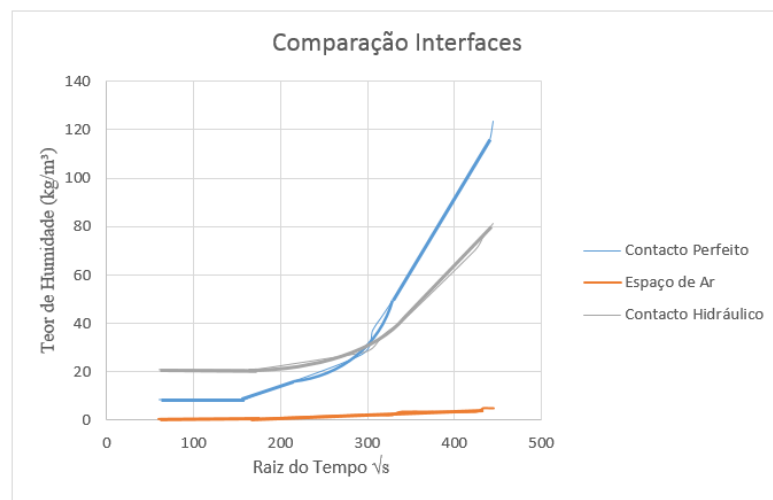


Figura 4.21. – Curvas de absorção de água por capilaridade do interior das interfaces.

Na análise gráfica verifica-se que as três curvas partem de um patamar que corresponde à fase em que a água não atingiu a interface. Como esperado, o maior teor de humidade corresponde à interface em contacto hidráulico e a menor à interface com espaço de ar. No primeiro caso o valor deve-se ao elevado teor de humidade da argamassa, enquanto no caso do espaço de ar o teor é reduzido por não haver transmissão de fluxo. A interface de contacto perfeito apresenta um valor intermédio.

A partir desse ponto a interface de contacto perfeito apresenta valores mais elevados de absorção e a sua curva é composta por duas fases: a primeira fase em que há um aumento do teor de humidade com crescimento linear moderado e a segunda fase caracterizada por um crescimento brusco do teor de humidade. Os declives diferentes da primeira e segunda fase são originados pela resistência hídrica que a descontinuidade porosa cria na zona de interface. Quando existe justaposição de elementos não há continuidade da estrutura porosa porque ela não se interpenetra e isso traduz-se num atraso da absorção da água (primeira fase). Com base nesta resistência hídrica, o teor de humidade avança na segunda camada mais rapidamente e por isso verifica-se a última fase da curva que consiste numa reta de maior declive que a anterior.

A interface espaço de ar não tem um crescimento relevante e há variações quase impercetíveis do teor de humidade que se mantém perto de zero. A curva de absorção, neste caso, traduz o corte hídrico característico desta interface e que resulta do transporte de humidade se passar a efetuar sob forma de vapor.

O teor de humidade da argamassa é bastante superior ao teor de humidade do restante material e, por isso, quando a água atinge a interface, há um pequeno aumento do teor de humidade que se tinha mantido

constante até então. Quando a água, na zona da interface, atinge valores próximos do teor de humidade da argamassa, o crescimento do teor de humidade processa-se a um ritmo mais elevado.

A comparação de curvas de absorção capilar no interior de interfaces permite concluir que, localmente, a cinética da embebição corresponde ao previsto. No entanto, o WUFI 2D considera a globalidade do provete e este comportamento local não é traduzido. O facto dos blocos serem do mesmo material e as interfaces terem uma pequena espessura faz com que a diferença do transporte de humidade na zona da interface pouco influencie o transporte de água “global”.

#### 4.4. ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS

A comparação dos resultados laboratoriais com os resultados das simulações numéricas permite aferir sobre a utilização de programas de cálculo automático na análise da cinética de embebição de elementos multicamada.

A figura 4.22. representa as curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes monolíticos obtidas nos ensaios e nas simulações.

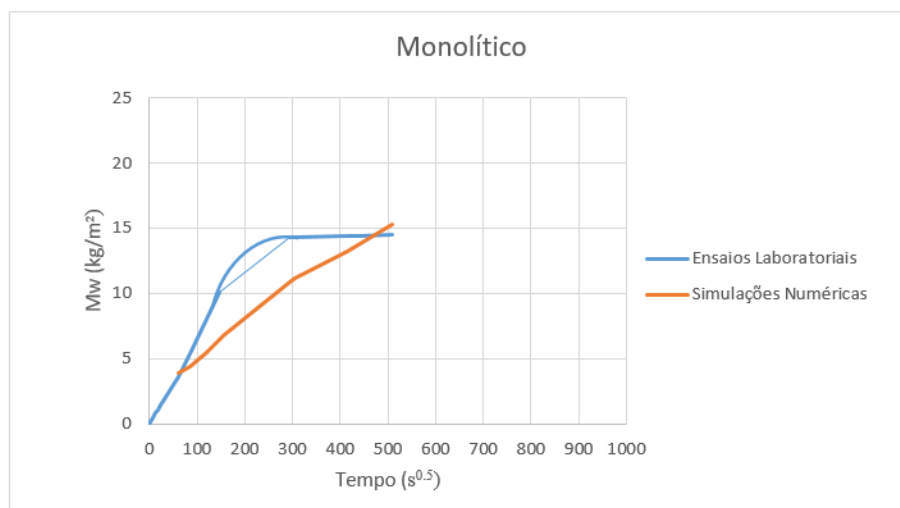


Figura 4.22. – Curvas de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, do provete monolítico.

A análise do gráfico da figura 4.22. permite concluir que a absorção da água no final dos trabalhos é idêntica, mas com diferente duração e progressão.

Nos ensaios laboratoriais verifica-se um troço inicial de declive acentuado que corresponde às primeiras horas de embebição. Com a subida do teor de humidade o crescimento passa a efetuar-se de forma mais lenta até se aproximar do teor de humidade de saturação, situação que corresponde ao patamar de estabilização, onde a evaporação se aproxima da absorção.

No caso da simulação, a absorção de água efetua-se, também, de forma linear, mas com um declive menos acentuado em comparação com os ensaios. A alteração na velocidade de absorção, correspondente à segunda curva de declive menor ocorre para um valor muito próximo do teor de humidade para o qual também há mudança de declive na curva dos ensaios. A curva não estabiliza dentro do intervalo de tempo analisado.

Nos elementos monolíticos, a maior diferença entre ensaios e simulações numéricas ocorre na progressão e na duração da absorção de água. Esta situação pode ter origem nos diferentes valores característicos do material utilizado nos ensaios e nas simulações.

No caso do contacto perfeito as diferenças entre curvas já são mais significativas como se visualiza na figura 4.23. que representa as curvas de absorção dos provetes em contacto perfeito

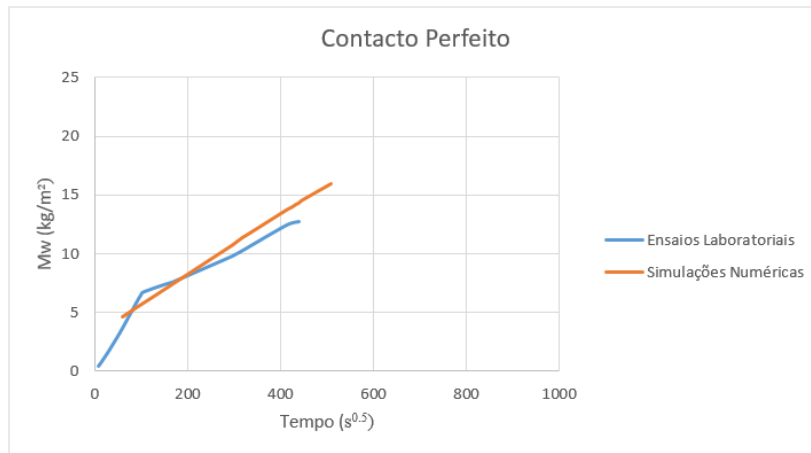


Figura 4.23. – Curvas de absorção de água por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes em contacto perfeito.

A análise da curva permite concluir que a absorção de água não apresenta um comportamento idêntico nas curvas e nas simulações numéricas.

Os ensaios laboratoriais de absorção de água por capilaridade de um provete em contacto perfeito apresentam duas fases distintas. A primeira fase, semelhante à do provete monolítico, traduz a absorção inicial que se dá de forma mais rápida e por isso a curva apresenta um declive mais acentuado. A passagem para a segunda fase de absorção, segunda fase da curva, surge quando a água atinge a zona da interface. Quando a interface é atingida, pelo facto da estrutura porosa de ambos os elementos não ser contínua, verifica-se uma resistência hídrica. Esta resistência provoca um atraso na embebição traduzido pelo menor declive da segunda curva.

No caso da simulação efetuada no WUFI 2D a absorção da água é contínua e representada por uma curva linear. Esta situação mostra que a resistência hídrica não é tida em conta pelo programa, embora ocorra localmente, como explicitado anteriormente. A curva relativa à simulação numérica, do modo como foi construída, não traduz corretamente a forma como se dá o transporte de humidade em elementos com a interface contacto perfeito.

As curvas da interface espaço de ar, apresentadas na figura 4.24. são aquelas cujo comportamento é mais díspar.

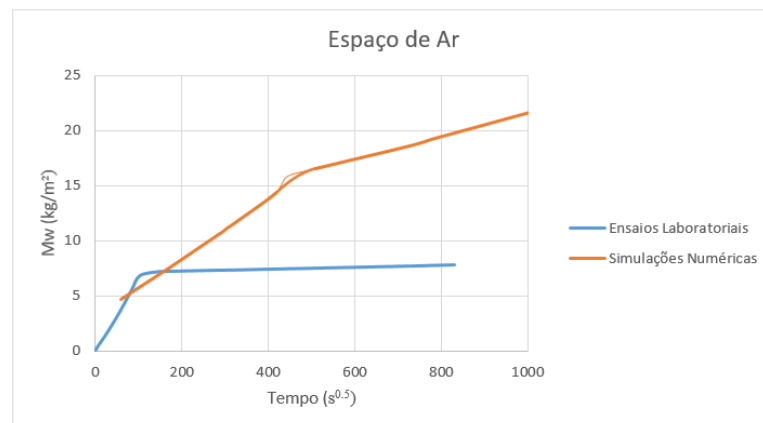


Figura 4.24. – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes com espaço de ar.

A curva que fornece os resultados obtidos nos ensaios apresenta um primeiro troço, que traduz a absorção de água antes desta atingir a interface, com um declive acentuado, onde a absorção de água é mais rápida. Quando a água atinge o espaço de ar, o transporte passa a ser efetuado em fase de vapor gerando-se uma espécie de “corte hídrico” que não permite a passagem de água líquida entre elementos. A influência do “corte hídrico” é traduzida pelo patamar correspondente ao segundo troço, já que a estabilização da massa de água permite concluir que esta não passa para o segundo elemento, mantendo-se em valores muito baixos.

Quando a interface espaço de ar é simulada, a curva apresenta um desenvolvimento semelhante ao expectável para a curva do provete em contacto perfeito. A absorção inicial é linear, tal como em todos os provetes, mas quando a água atinge a interface não é considerada a resistência real mas apenas um atraso na embebição que pode ser resultado do próprio ar enquanto material. A progressão da absorção da água não se faz no mesmo intervalo de tempo dos ensaios devido às diferentes características dos materiais utilizados.

Nos provetes em contacto hidráulico não se verifica grande concordância entre as curvas, para lá do troço inicial de crescimento linear.

Tal como nos casos anteriores, os ensaios laboratoriais traduzem o comportamento esperado.

A curva relativa aos ensaios laboratoriais ocorre em três fases: a primeira, de crescimento inicial rápido; a segunda, em que água atinge a interface e por isso se verifica um atraso na embebição dos provetes. Este atraso resulta de uma resistência hídrica que o elevado teor de humidade inicial da pasta de contacto introduz; a terceira fase é já um patamar que corresponde à estabilização da massa de água por o provete estar perto da saturação.

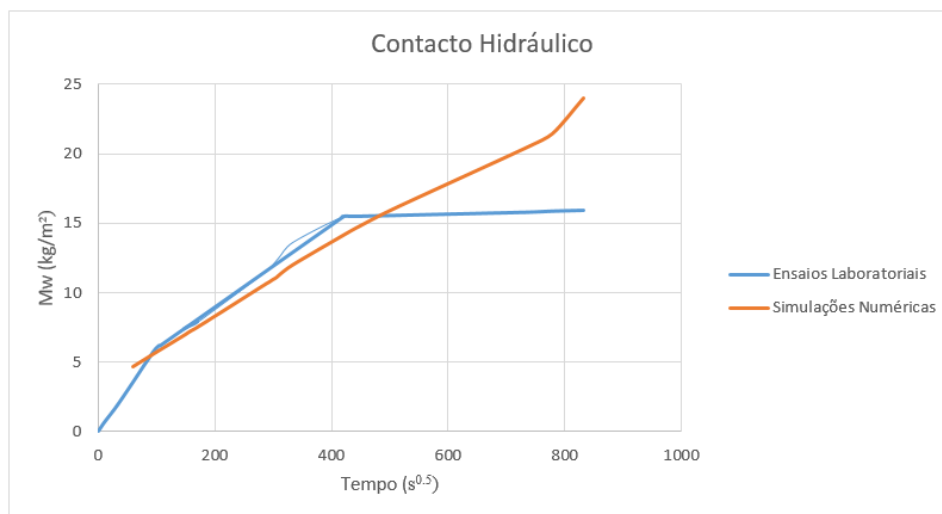


Figura 4.25. – Curvas de absorção por capilaridade, em função da raiz do tempo, dos provetes em contacto hidráulico.

Na figura 4.25. que apresenta as curvas de absorção nos ensaios e nas simulações, verifica-se que a curva relativa à simulação numérica é composta apenas por duas fases em que a primeira fase de absorção é linear e se prolonga bastante no tempo.

Por outro lado, o segundo troço tem o comportamento oposto ao dos ensaios. Não se verifica o atraso na embebição, mas um aumento do declive da curva de crescimento. Este aumento tem origem no facto de, após a água atingir a interface, o WUFI 2D passar a considerar a permeabilidade da argamassa pelo

que o transporte de água se efetua de forma mais rápida. Novamente não há estabilização da curva do provete simulado.

Conclui-se que a influência da interface no transporte de humidade não é considerada pelo WUFI 2D diretamente. Embora o comportamento esperado seja visível na análise local do interior da interface, este não se traduz na análise global. Na globalidade o WUFI 2D encara os materiais iguais e não tem em conta, pelo menos diretamente, o transporte de humidade ao longo das interfaces.

Uma hipótese muito utilizada para ultrapassar esta limitação é criar camadas fictícias com propriedades adequadas que traduzam a resistência hídrica. No WUFI 2D podem ser introduzidas camadas, entre o material e argamassa, cujas propriedades influenciem a absorção de água e introduzam a resistência hídrica esperada quando a água atinge a interface

A partir das curvas acima discutidas foram retirados os coeficientes de capilaridade que são apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4.8. – Comparação dos valores dos coeficientes de capilaridade.

	Coeficientes de Capilaridade (kg/ (m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ))			
	Monolítico	Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
Ensaaios Laboratoriais	≈ 0.07	≈ 0.07	≈ 0.07	≈ 0.06
Simulações Numéricas	≈ 0.03	≈ 0.03	≈ 0.03	≈ 0.02

Os coeficientes de capilaridade, declives do primeiro troço de cada uma das curvas, são semelhantes quer nos ensaios, quer nas simulações e estão de acordo com as curvas acima apresentada. Embora se verifique que os valores são mais elevados nos ensaios, isso deve-se ao material ensaiado ter características de porosidade ligeiramente diferentes da do material utilizado na simulação. Todavia, ambos os processos têm um valor constante nos primeiros três tipos de amostra e vêm o seu valor diminuir no caso dos provetes em contacto hidráulico. Esta diminuição resulta do teor de humidade das pastas de contacto ser superior ao do restante material, o que se traduz numa embebição inicial mais lenta.

Os valores obtidos para os coeficientes encontram-se próximos do obtido no estudo de tijolos imersos em água realizado por Freitas *et al.* [17] que foi de 0.05 (kg/ (m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>)) e dentro do intervalo de valores de 0.1448 (kg/ (m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>)) e 0.084 (kg/ (m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>)) obtidos por Joana Azevedo [21] e Mukhopadhyaya *et al.* [22], respetivamente. Para o cálculo do FLUMAX, fluxo máximo transmitido na zona da interface, foram analisadas as curvas de absorção de água, em função do tempo, somente para as amostras que contêm interfaces. Na figura 4.26. apresenta-se a curva relativa aos ensaios e simulação dos provetes em contacto perfeito.

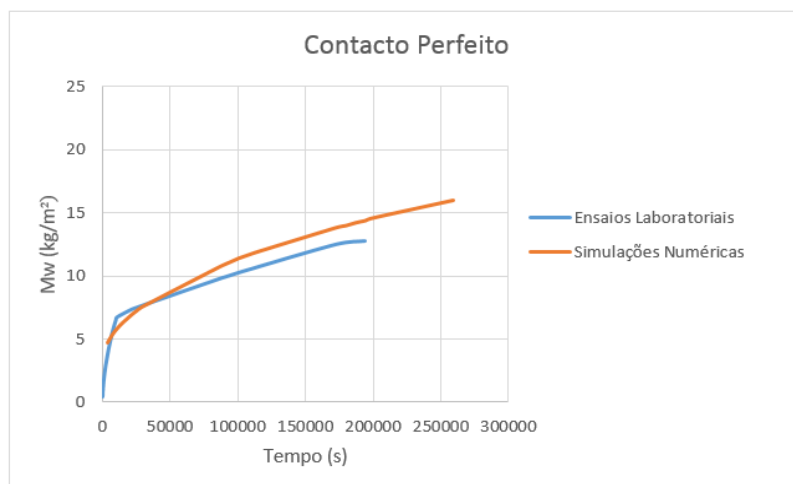


Figura 4.26. – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes em contacto perfeito.

Relativamente aos provetes em contacto perfeito, o declive dos segundos troços na curva dos ensaios e na curva das simulações numéricas é semelhante pelo que os valores de FLUMAX são, também eles, semelhantes.

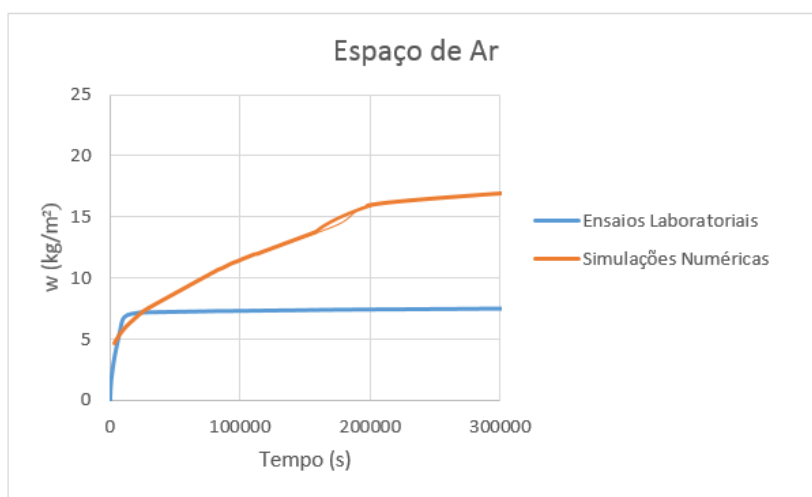


Figura 4.27. – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes com espaço de ar.

No caso dos provetes com espaço de ar, cujas curvas se encontram na figura 4.27., a análise gráfica já permite concluir que os valores diferem substancialmente. A não consideração da resistência hídrica por parte do WUFI 2D, de modo direto, faz com que haja um segundo troço ascendente, enquanto nos ensaios este segundo troço é praticamente horizontal e, consequentemente, de declive praticamente nulo. Como o transporte de humidade se faz em fase de vapor na zona da interface, era de esperar um valor muito baixo de fluxo máximo transmitido, que se traduz por um segundo troço praticamente horizontal. Por último a análise das curvas de absorção relativas aos provetes em contacto hidráulico estão representadas na figura 4.28.

O contacto hidráulico é aquele onde os resultados dos ensaios e da simulação numérica mais se afastam.



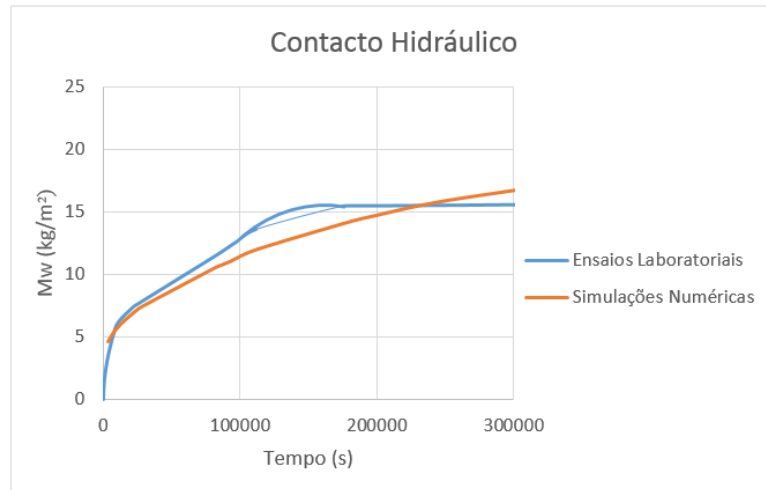


Figura 4.28. – Curvas de absorção por capilaridade, em função do tempo, dos provetes em contacto hidráulico.

A visualização gráfica da curva permite identificar que a diferença fundamental está na passagem para o segundo troço, isto é, quando a água atinge a interface. Enquanto nos ensaios há a mudança para um troço de menor declive que acaba por estabilizar, no caso da simulação há um acentuar do declive relativamente ao primeiro troço.

Este comportamento pode ser explicado pelo facto do WUFI 2D não considerar a diferente porosidade da pasta de contacto, nem a interpenetração entre camadas. A análise global efetuada pelo modelo de simulação dinâmica considera continuidade da estrutura porosa e por isso, quando a água atinge a interface, não admite resistência hídrica mas sim um aumento da massa de água que resulta da consideração da porosidade da argamassa.

Na tabela 4.9. encontram-se os valores do FLUMAX dos ensaios e das simulações.

Tabela 4.9. – Comparação dos valores do FLUMAX.

FLUMAX (kg/ (m².s))			
	Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
Ensaio Laboratoriais	$\approx 40 \times 10^{-6}$	$\approx 2 \times 10^{-6}$	$\approx 70 \times 10^{-6}$
Simulações Numéricas	$\approx 40 \times 10^{-6}$	$\approx 400 \times 10^{-6}$	$\approx 1100 \times 10^{-6}$

Os valores obtidos nos ensaios laboratoriais vão de encontro aos obtidos por Vasco Peixoto Freitas [5] de  $44 \times 10^{-6}$  kg/ (m².s) e  $4 \times 10^{-6}$  kg/ (m².s) para os provetes em contacto perfeito e com espaço de ar, respetivamente. Quanto aos valores das simulações verifica-se o esperado tendo em conta a análise gráfica das curvas: um valor do contacto perfeito dentro do intervalo expectável; um valor muito alto do espaço de ar por não haver “corte hídrico”, embora este exista; um valor para o contacto hidráulico de uma ordem superior à dos restantes que reflete a continuidade da estrutura porosa considerada pelo WUFI 2D.

#### **4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO**

Neste capítulo foram efetuadas simulações que procuraram reproduzir os valores obtidos nos ensaios laboratoriais para posteriores comparações. Analisaram-se as diferenças observadas entre as curvas de absorção por capilaridade dos ensaios e das simulações.

Ao nível das interfaces foi apresentada a curva de absorção capilar local, ou seja, a curva de absorção capilar no ponto médio de cada interface. Analisou-se sob o ponto de vista do comportamento teórico esperado.

Foram apresentadas as curvas de absorção em função da raiz do tempo e calculados os coeficientes de capilaridade simulados e ensaiados. As tabelas 4.10. e 4.11. resumem as informações mais importantes desses cálculos.

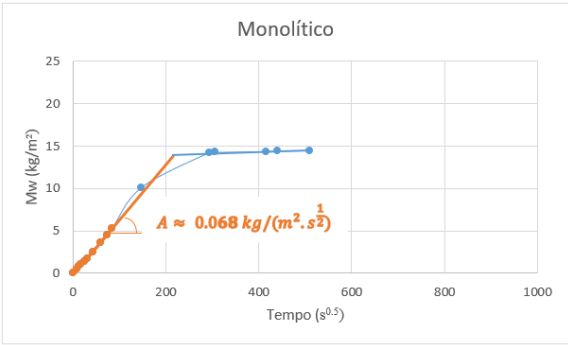
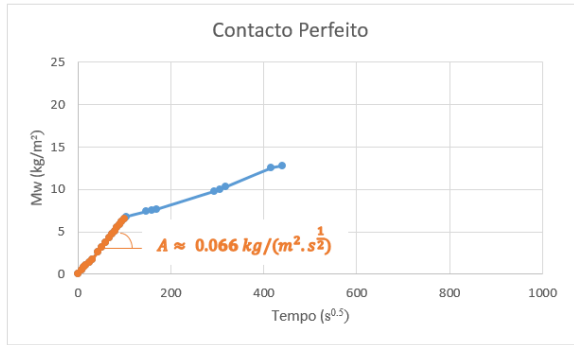
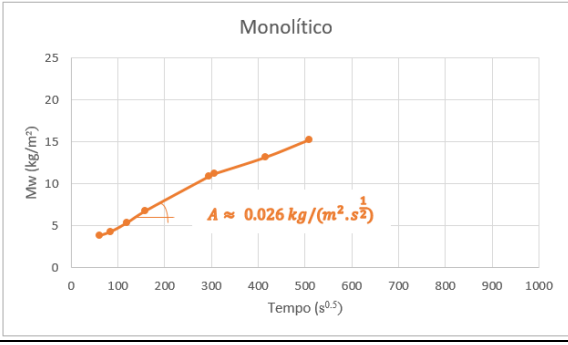
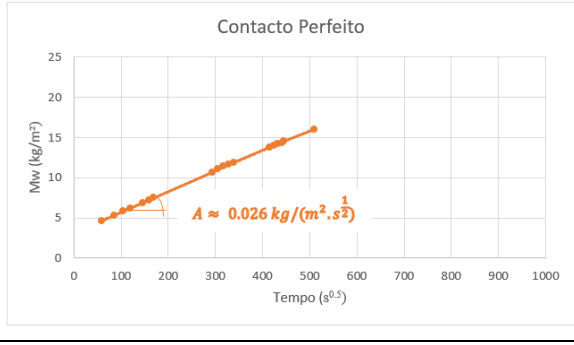
Foi calculado o FLUMAX para as três amostras com interfaces e foram apresentadas e discutidas as curvas de absorção em função do tempo relativas a ensaios e simulações, como se resume na tabela 4.12.

Em síntese pode afirmar-se que o WUFI 2D não considera resistência hídrica, no caso das interfaces contacto hidráulico e contacto perfeito e o “corte hídrico” no caso da interface espaço de ar.

Conclui-se que:

- A interface contacto perfeito apresenta uma curva semelhante à do monolítico por o programa de cálculo automático considerar que há continuidade da estrutura porosa entre os dois elementos;
- A interface espaço de ar não apresenta “corte hídrico”, porque, em termos de simulação, não há alteração do estado da água quando esta atinge a interface, ou seja, a passagem de água continua a fazer-se no estado líquido em vez de ser feita na fase de vapor como esperado;
- A interface contacto hidráulico não apresenta resistência hídrica mas, pelo contrário, apresenta um aumento do teor de humidade quando a água atinge a interface. Esta situação surge porque o WUFI 2D, a partir do momento da chegada da água à zona de interface, passa a considerar a porosidade da argamassa, que por ser superior ao do restante material, faz com que haja mais absorção de água;
- No ponto médio da interface a progressão do teor de humidade corresponde ao esperado. Localmente as curvas de absorção assemelham-se às dos ensaios laboratoriais porque as resistências hídricas são consideradas e há “corte hídrico” na interface espaço de ar.
- A progressão verificada no ponto médio da interface não influencia a progressão “global”, isto é, apesar de no interior da interface o transporte de humidade ser o expectável, não influencia o transporte de humidade “global” traduzido nas curvas de absorção de água por capilaridade.

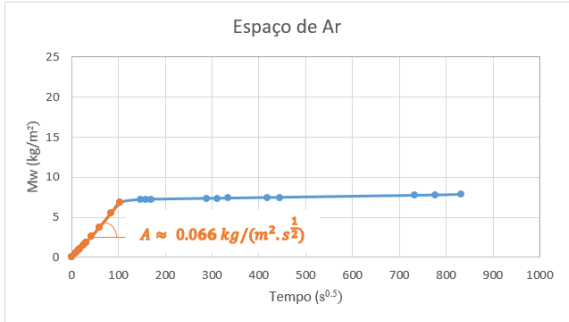
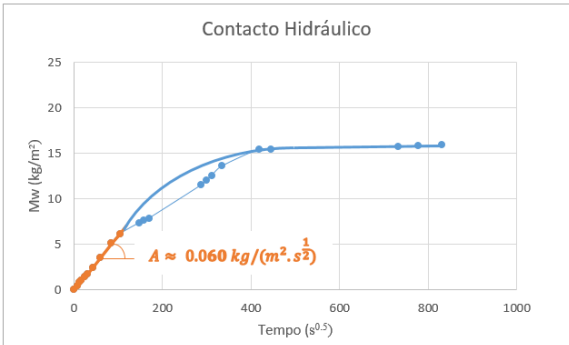
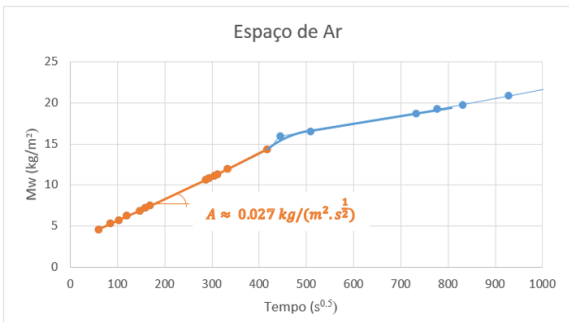
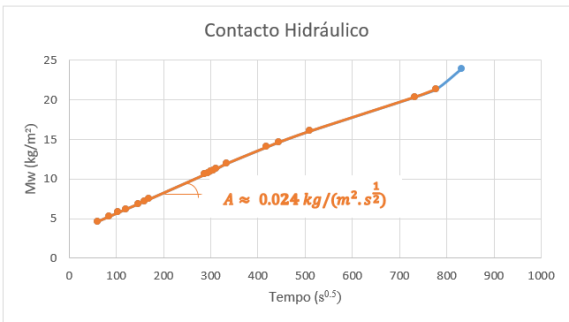
Tabela 4.10. Resumo dos resultados dos ensaios vs simulações para o coeficiente de capilaridade dos elementos monolítico e em contacto perfeito.

Ensaio Laboratoriais	
Curvas de absorção por capilaridade em função da raiz do tempo	
Monolítico	Contacto Perfeito
	
Coeficientes de Capilaridade (kg/ (m².s <sup>1/2</sup> ))	
Monolítico	Contacto Perfeito
≈ 0,068	≈ 0.066
Simulações Numéricas	
Curvas de absorção por capilaridade em função da raiz do tempo	
Monolítico	Contacto Perfeito
	
Coeficientes de Capilaridade (kg/ (m².s <sup>1/2</sup> ))	
Monolítico	Contacto Perfeito
≈ 0.026	≈ 0.026

A análise da tabela permite concluir que, tal como esperado, os valores são semelhantes porque a água ainda não atingiu a interface.

As simulações numéricas apresentam valores mais baixos dos coeficientes devido às diferenças dos valores característicos do material simulado face ao material ensaiado.

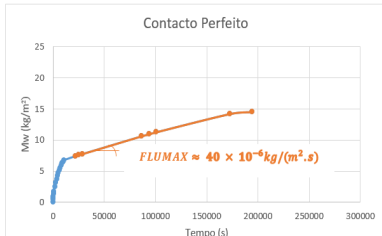
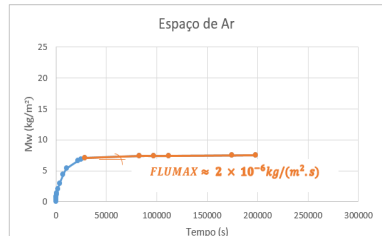
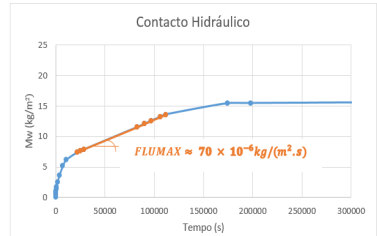
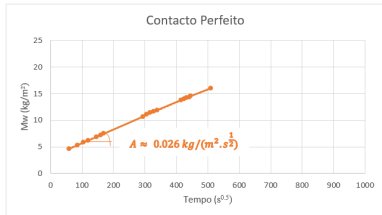
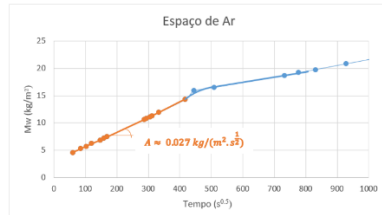
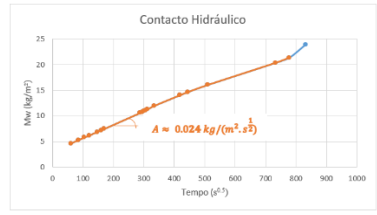
Tabela 4.11. Resumo dos resultados dos ensaios vs simulações para o coeficiente de capilaridade dos elementos com espaço de ar e em contacto hidráulico.

Ensaio Laboratoriais	
Curvas de absorção por capilaridade em função da raiz do tempo	
Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
	
Coeficientes de Capilaridade (kg/ (m².s <sup>1/2</sup> ))	
Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
≈ 0,066	≈ 0.066
Simulações Numéricas	
Curvas de absorção por capilaridade em função da raiz do tempo	
Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
	
Coeficientes de Capilaridade (kg/ (m².s <sup>1/2</sup> ))	
Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
≈ 0.027	≈ 0.024

A observação da tabela permite concluir que os provetes com espaço de ar e em contacto hidráulico apresentam valores semelhantes do coeficiente de capilaridade por se tratar da primeira fase de embebição, em que a água não atingiu a interface.

Comparando as simulações numéricas e os ensaios laboratoriais, estes últimos apresentam valores maiores do coeficiente devido às diferentes características do material ensaiado e o material simulado.

Tabela 4.12. – Resumo dos resultados dos ensaios vs simulações para o FLUMAX.

Ensaio Laboratoriais		
Curvas de absorção por capilaridade em função do tempo		
Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
		
FLUMAX (kg/(m².s))		
Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
$\approx 40 \times 10^{-6}$	$\approx 2 \times 10^{-6}$	$\approx 70 \times 10^{-6}$
Simulações Numéricas		
Curvas de absorção por capilaridade em função do tempo		
Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
		
Contacto Perfeito	Espaço de Ar	Contacto Hidráulico
$\approx 40 \times 10^{-6}$	$\approx 400 \times 10^{-6}$	$\approx 1100 \times 10^{-6}$

A análise da tabela permite concluir que só os valores dos elementos em contacto perfeito são semelhantes. Pelo facto de o WUFI 2D não traduzir a resistência hídrica associada ao FLUMAX, no caso das simulações numéricas, este valor pode ser coincidência.

Nos elementos com espaço de ar e em contacto hidráulico, os valores do FLUMAX são bastante superiores nas simulações numéricas. Deve-se ao facto de o WUFI 2D não considerar a resistência hídrica, mas uma continuidade da estrutura porosa que aumenta o valor do fluxo máximo transmitido. No contacto hidráulico este valor deve-se, ainda, à consideração da porosidade da argamassa a partir do momento em que a água atinge a interface. Uma maior porosidade origina um maior FLUMAX.

Para introduzir a resistência hídrica na interface contacto hidráulico criam-se camadas fictícias de porosidade adequada que inseridas entre a montante e a jusante da argamassa gerem a resistência hídrica esperada.

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na conclusão deste trabalho podemos afirmar que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos.

Foi possível recriar no WUFI 2D os ensaios laboratoriais através da definição de condições ambientais semelhantes e da escolha de materiais com comportamento semelhante ao dos ensaios no transporte de humidade.

Foram calculados os valores dos coeficientes de capilaridade para todos os elementos e o valor do FLUMAX para os elementos com interface simulados no WUFI 2D.

Foi possível a comparação entre os valores das simulações numéricas, os valores dos ensaios laboratoriais e os valores de ensaios presentes em estudos do fenómeno de interface.

O desenvolvimento deste trabalho foi-se tornando mais exigente devido aos vários desafios que iam aparecendo. A escassez de bibliografia referente ao fenómeno da interface, o tempo dedicado à aprendizagem de duas versões do programa e do seu funcionamento a nível de introdução de dados, simulação e resultados, a escolha dos materiais que mais se aproximam dos utilizados nos ensaios e o tratamento dos dados foram algumas das etapas mais complicadas deste processo.

No final da análise dos dados das simulações numéricas conclui-se que:

- O WUFI não considera a existência da resistência hídrica nas interfaces contacto perfeito e contacto hidráulico. Na interface contacto perfeito considera o elemento como monolítico cuja absorção de água por capilaridade se faz de forma linear. No caso da interface em contacto hidráulico, quando a água atinge a interface, o WUFI 2D passa a considerar a porosidade da argamassa que se traduz numa curva de declive acentuado por oposição à curva de menor declive expectável;
- Não há “corte hídrico” na interface de espaço de ar porque o programa de simulação numérica não considera o transporte de humidade na fase de vapor. Só há passagem de água em estado líquido;
- A análise do transporte de humidade no interior das interfaces mostrou que, localmente, existe resistência hídrica nos provetes em contacto perfeito e contacto hidráulico e “corte hídrico” nos provetes com espaço de ar. No entanto, essa diferença local no transporte de humidade não influencia o transporte de humidade “global” e, por isso, este não corresponde ao teoricamente esperado.
- O facto do valor do FLUMAX na interface em contacto hidráulico estar próximo do expectável pode ser coincidência já que a consideração desse valor não é traduzida na curva de absorção correspondente através da resistência hídrica.

Pode concluir-se da análise comparativa que:

- A diferença dos valores caraterísticos dos materiais faz com que as simulações não estabilizem no mesmo intervalo de tempo dos ensaios laboratoriais;
- O valor do FLUMAX, embora seja semelhante na interface contacto perfeito, é bastante superior nos casos das interfaces espaço de ar e contacto hidráulico nas simulações. Esta diferença mostra que não é considerada a resistência hídrica, no contacto hidráulico, e o “corte hídrico”, no espaço de ar, pelo WUFI 2D e por isso não há limitação do fluxo máximo transmitido.
- Os coeficientes de capilaridade são semelhantes, embora os dos ensaios tenham um valor superior. Esta situação era expectável já que não existe interferência da interface na fase inicial de embebição. A diferença entre os valores deve-se às diferentes caraterísticas do material ensaiado e do material simulado.
- O ensaio da interface em contacto perfeito prova a existência de uma resistência hídrica que não existe nas simulações;
- O “corte hídrico” gerado pelo transporte de humidade em fase de vapor presente nos ensaios, não se reflete nas simulações pois o WUFI 2D considera o transporte de humidade em fase líquida;
- Os provetes em contacto hidráulico apresentam um comportamento bastante diferente já que nos ensaios o teor de humidade tende para valores próximos do teor de humidade da camada de argamassa enquanto na simulação este valor continua a crescer e não estabiliza. O crescimento acentuado do teor de humidade após a água atingir a interface deve-se ao facto de o WUFI 2D passar a considerar a porosidade da argamassa que, por ser muito superior, acelera o processo de absorção de água.

Após este trabalho conclui-se que seria interessante alterar o WUFI 2D para que fosse possível introduzir o FLUMAX como input, assim como associar uma resistência hídrica ao material na interface, no sentido de aproximar o transporte de humidade ao teoricamente esperado.

## **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

No seguimento deste trabalho muitos temas podem surgir dentro do mesmo âmbito, como por exemplo:

- Fazer as simulações variando os materiais constituintes. Utilizar uma pedra natural, por exemplo.
- Variar os tipos de interfaces. Utilizar interfaces verticais e interfaces de espessura variável;
- Simular elementos multicamadas de dimensões reais utilizados correntemente em construções;
- Avaliar o tempo de secagem de elementos de construção com interfaces em vários cenários climáticos;
- Simular a interface contacto hidráulico colocando camadas fictícias, de porosidade intermédia à do tijolo e argamassa, a montante e a jusante da zona de interface;
- Simular ensaios de absorção por capilaridade com sais, partindo, por exemplo, de trabalhos efetuados por: Teresa Gonçalves [23] e [24], Joana Azevedo [21].

## BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://paginas.fe.up.pt/~earpe/conteudos/TPPC/Sebenta.pdf>. 30 de Abril de 2015.
- [2] T. de S. M. R. Rego, “Efeito de soluções aquosas salinas nos processos de embebição de paredes com múltiplas camadas,”. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [3] A. G. F. Gibb, “Cladding interface management UOB PLAZA, singapore,” 1996.
- [4] H. Derluyn, H. Janssen, and J. Carmeliet, “Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 9, pp. 3685–3693, 2011.
- [5] V. P. Freitas, “Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios,”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1992.
- [6] X. Qiu, “Moisture transport across interfaces between building materials,”. Tese de Doutoramento, Concordia University, Montreal, Canadá, 2003.
- [7] H. Depraetere, W.; Carmeliet, J.; Hens, “Moisture Transfer at Interfaces of Porous Materials: Measurements and Simulations,” in *Historic Mortars: Characteristics and Tests*, 2000, pp. 249–259.
- [8] M. Bomberg, “Moisture flow through porous building materials,” Lund - Sweden, 1974.
- [9] H. J. P. Brocken, “Moisture transport in brick masonry: the grey area between bricks.” p. 172, 1998.
- [10] H. Janssen, H. Derluyn, and J. Carmeliet, “Moisture transfer through mortar joints: A sharp-front analysis,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 8, pp. 1105–1112, 2012.
- [11] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/). 13 de Abril de 2015.
- [12] M. J. A. Morais, “Simulação numérica da humidade ascensional em edifícios históricos,”. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [13] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=533/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=533/). 13 de Abril de 2015.
- [14] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=148](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=148). 13 de Abril de 2015.
- [15] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=362](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=362). 13 de Abril de 2015.
- [16] <http://paginas.fe.up.pt/~wufi/>. 20 de Abril de 2015.
- [17] V. P. Freitas, M. I. Torres, and A. S. Guimarães, *Humidade Ascensional*. 2008.



- [18] H. M. Künzels, “Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One and Two Dimensional Calculation using Simple Parameters,” 1994.
- [19] H. M. KÜNZEL and K. KIESSL, “Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 40, no. 1, pp. 159–167, Oct. 1996.
- [20] A. S. Guimarães, “Dimensionamento de sistemas de ventilação da base das paredes para tratamento da humidade ascensional,”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [21] J. Azevedo, “Absorção por capilaridade de soluções salinas em materiais porosos,”. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [22] P. Mukhopadhyaya, K. Kumaran, N. Normandin, and P. Goudreau, “Effect of Surface Temperature on Water Absorption Coefficient of Building Materials,” *J. Build. Phys.*, vol. 26, no. 2, pp. 179–195, Oct. 2002.
- [23] T. D. Gonçalves, “Salt crystallization in plastered or rendered walls,”. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Janeiro 2007.
- [24] T. Diaz Gonçalves and J. Delgado Rodrigues, “Evaluating the salt content of salt-contaminated samples on the basis of their hygroscopic behavior. Part I: Fundamentals, scope and accuracy of the method,” *J. Cult. Herit.*, vol. 7, no. 2, pp. 79–84, Abril de 2006.